

# Mikrolaka ovjesna jedrilica s motorom

---

Guina, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:689986>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Vedran Guina**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Igor Karšaj

Student:

Vedran Guina

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Karšaju na pruženom znanju te Ninu Horvatu mag. ing. mech. na velikoj pomoći, odvojenom vremenu i stručnim savjetima koji su mi mnogo pomogli u pisanju ovog rada.

Hvala obitelji na velikoj podršci tijekom studiranja. Također, hvala djevojci, prijateljima i kolegama što su vjerovali u mene i uvijek bili podrška.

Vedran Guina



SVFUCILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa	
Ur. broj	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student

**Vedran Guina**

Mat. br.: 0035200122

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Mikrolaka ovjesna jedrilica s motorom**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Microlight trike**

Opis zadatka:

Ovjesna jedrilica s motorom je sportsko rekreativna letjelica koja spada u kategoriju mikrolakih zrakoplova. Konstrukcija letjelice sastoji se od ovjesne jedrilice tj. Rogallovog krila koje je preko zgloba spojeno na kolica s motorom. Na kolicima se nalazi sjedalo za pilota, a za vrijeme leta pilot pomicanjem kolica u odnosu na ovjesnu jedrilicu pomiče težište cjelokupne konstrukcije i time upravlja letjelicom.

U okviru rada potrebno je konstruirati i proračunati kolica motorne ovjesne jedrilice. Cilj je razviti kolica što manje mase kako bi kod korištenja uzlaznih zračnih strujanja let i jedrenje bili mogući s ugašenim motorom. Uz što manju masu, dodatni konstrukcijski zahtjevi su: pravilan raspored mase i položaj motora kako bi se osigurala upravljivost, udoban položaj sjedenja pilota, mogućnost jednostavnog sastavljanja i rastavljanja kolica radi transporta, aerodinamičan oblik, jednostavnost konstrukcije te sigurnost. U sklopu proračuna, potrebno je odrediti opterećenja koja djeluju na kolica te pomoću metode konačnih elemenata numerički analizirati i provjeriti čvrstoću pojedinih dijelova konstrukcije.

Dodatne informacije dostupne su prema potrebi.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.


Predvideni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

  
Izv.prof. dr. sc. Igor Karšaj

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1 Povijest zmajarstva.....	1
1.2 Ovjesne jedrilice s motorom .....	4
1.2.1 Osnovna konstrukcija kolica .....	4
1.2.2 Upravljanje letjelicom .....	5
1.3 Tehnike letenja .....	7
2. KONSTRUKCIJA MIKROLAKE OVJESNE JEDRILICE S MOTOROM.....	9
2.1 Analiza tržišta.....	9
2.1.1 Icaro 2000 electric trike .....	10
2.1.2 ATF trike .....	11
2.1.3 Aeros Nanolight trike .....	12
2.1.4 V-Lite trike.....	14
2.1.5 Snake trike.....	15
2.2 Analiza konstrukcijskih zahtjeva .....	16
2.2.1 Mala masa konstrukcije.....	16
2.2.2 Sklopivost i rastavljenost konstrukcije .....	17
2.3 Izrada koncepta .....	19
2.3.1 Dimenzioniranje konstrukcije .....	26
3. PRORAČUN KONSTRUKCIJE KOLICA MIKROLAKE OVJESNE JEDRILICE.....	30
3.1 Metoda konačnih elemenata.....	30
3.1.1 Odabir štapnog elementa.....	30
3.1.2 Odabir grednog elementa .....	31
3.1.2.1 Timoshenkove grede .....	31
3.1.2.2 Euler-Bernoullijeve grede .....	31
3.1.2.3 Definicija poprečnog presjeka .....	32
3.1.2.4 Orijehtacija poprečnog presjeka grede.....	33
3.2 Analiza naprezanja u letu .....	34
3.2.1 Rubni uvjeti pomaka tijekom leta .....	35
3.2.2 Opterećenje konstrukcije tijekom leta.....	36
3.2.2.1 Opcija <i>Coupling</i> .....	40
3.2.3 Mreža konačnih elemenata.....	42
3.2.4 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 1 .....	43
3.2.5 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 2 .....	46
3.2.6 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 3 .....	49
3.2.7 Pomaci konstrukcije tijekom leta .....	51

---

3.2.8	Konvergencija naprezanja .....	52
3.2.9	Usporedba rezultata analize za različite slučajeve opterećenja.....	53
3.3	Analiza naprezanja tijekom slijetanja .....	53
3.3.1	Udarno opterećenje .....	54
3.3.2	Rubni uvjeti tijekom slijetanja .....	55
3.3.3	Opterećenje tijekom slijetanja .....	56
3.3.4	Naprezanja konstrukcije tijekom slijetanja .....	57
3.3.5	Pomaci konstrukcije tijekom slijetanja .....	58
3.3.6	Naprezanja konstrukcije tijekom slijetanja nakon izmjena dimenzija cijevi .....	60
4.	ZAKLJUČAK.....	61
	LITERATURA.....	62

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Zmajarstvo [1] .....	1
Slika 2.	Lilienthalov let dvokrilnom jedrilicom [2].....	2
Slika 3.	Ovjesna jedrilica Otta Lilienthala [3] .....	2
Slika 4.	Rogallovo krilo [2] .....	3
Slika 5.	Osnovna konstrukcija krila [2] .....	3
Slika 6.	Aerodinamički profili krila [2] .....	4
Slika 7.	Osnovna konstrukcija kolica [2].....	5
Slika 8.	Upravljanje lijevo-desno [2].....	6
Slika 9.	Upravljanje brzinom [2] .....	6
Slika 10.	Slijetanje [2] .....	7
Slika 11.	Položaj pilota prilikom letenja ovjesnom jedrilicom [5].....	9
Slika 12.	Ležeći položaj kod motorne ovjesne jedrilice [6] .....	10
Slika 13.	Icaro 2000 [7] .....	10
Slika 14.	Icaro 2000 nakon sklapanja [7] .....	11
Slika 15.	ATF kolica [8] .....	11
Slika 16.	Sklopljena ATF kolica [8] .....	12
Slika 17.	Aeros Nanolight Trike-ANT [9].....	12
Slika 18.	Zglob za sklapanje pomoćnih cijevi stražnjih kotača [9] .....	13
Slika 19.	Sklopljene cijevi stražnjih kotača tijekom leta [10] .....	13
Slika 20.	Sklopljena ANT kolica [9] .....	14
Slika 21.	V-Lite [11].....	14
Slika 22.	Snake kolica [12] .....	15
Slika 23.	Rastavljena Snake kolica [12] .....	16
Slika 24.	Zglob na ANT kolicima [9].....	18
Slika 25.	Zglob za sklapanje okvira nosača sjedala [7] .....	18
Slika 26.	Zglob Snake kolica [12] .....	18
Slika 27.	Korištenje užadi [9] .....	19
Slika 28.	Koncept mikrolake ovjesne jedrilice .....	19
Slika 29.	Koncept kolica mikrolake ovjesne jedrilice .....	20
Slika 30.	Okvir sjedala.....	20
Slika 31.	Položaji sklopa prednjeg kotača .....	21
Slika 32.	Oznake cijevi .....	21
Slika 33.	<i>Quick pin</i> .....	22
Slika 34.	Uklanjanje cijevi 5.....	22
Slika 35.	Spoj cijevi 3 i 4.....	23
Slika 36.	Uklanjanje cijevi 4.....	23
Slika 37.	Spoj okvira sjedala i cijevi 3 .....	23
Slika 38.	Spoj cijevi 1 i 2.....	24
Slika 39.	Preklapanje okvira sjedala i odvajanje cijevi 1 .....	24
Slika 40.	Zglob cijevi 3.....	25
Slika 41.	Sklapanje cijevi 3 .....	25
Slika 42.	Sklapanje cijevi 6 i 7 .....	26
Slika 43.	Položaj ovjesišta .....	27
Slika 44.	Položaj sjedenja pilota visine 200 cm .....	28
Slika 45.	Položaj sjedenja pilota visine 180 cm .....	28
Slika 46.	Položaj sjedenja pilota visine 160 cm .....	28
Slika 47.	Orijentacija poprečnog presjeka [16] .....	33



Slika 48.	Veze između cijevi .....	35
Slika 49.	Rubni uvjeti tijekom leta .....	36
Slika 50.	Sile platna na okvir sjedala u 3D pogledu .....	37
Slika 51.	Sile platna .....	38
Slika 52.	Sile platna i kutovi.....	38
Slika 53.	Primjena opcije <i>Coupling</i> .....	40
Slika 54.	Greda opterećena silom $F$ .....	40
Slika 55.	Normalna naprezanja grede opterećene silom $F$ .....	41
Slika 56.	Greda opterećena silama $F_1$ i $F_2$ .....	41
Slika 57.	Normalna naprezanja grede opterećene silama $F_1$ i $F_2$ .....	41
Slika 58.	Analogni proračun grede .....	42
Slika 59.	Mreža konačnih elemenata .....	43
Slika 60.	Sile i rubni uvjeti za slučaj opterećenja 1 .....	43
Slika 61.	Ekvivalentna naprezanja prema von Misesu za slučaj opterećenja 1 .....	44
Slika 62.	Normalna naprezanja za slučaj opterećenja 1 .....	45
Slika 63.	Tangencijalna naprezanja za slučaj opterećenja 1 .....	45
Slika 64.	Sile i rubni uvjeti za slučaj opterećenja 2 .....	46
Slika 65.	Ekvivalentna naprezanja za slučaj opterećenja 2 .....	47
Slika 66.	Normalna naprezanja za slučaj opterećenja 2 .....	48
Slika 67.	Tangencijalna naprezanja za slučaj opterećenja 2 .....	48
Slika 68.	Sile i rubni uvjeti u slučaju opterećenja 3 .....	49
Slika 69.	Ekvivalentna naprezanja za slučaj opterećenja 3 .....	50
Slika 70.	Normalna naprezanja za slučaj opterećenja 3 .....	50
Slika 71.	Tangencijalna naprezanja za slučaj naprezanja 3 .....	51
Slika 72.	Pomaci za slučaj opterećenja 1 .....	51
Slika 73.	Pomaci za slučaj opterećenja 2 .....	52
Slika 74.	Pomaci za slučaj opterećenja 3 .....	52
Slika 75.	Konvergencija rješenja .....	53
Slika 76.	Rubni uvjeti prilikom slijetanja .....	56
Slika 77.	Opterećenje tijekom slijetanja .....	56
Slika 78.	Ekvivalentna naprezanja tijekom slijetanja .....	57
Slika 79.	Normalna naprezanja tijekom slijetanja .....	57
Slika 80.	Tangencijalna naprezanja prilikom slijetanja .....	58
Slika 81.	Progib u smjeru X osi .....	58
Slika 82.	Progib u smjeru Y osi .....	59
Slika 83.	Progib u smjeru Z osi .....	59
Slika 84.	Ekvivalentna naprezanja konstrukcije s izmijenjenim profilima .....	60

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba materijala [13] .....	17
Tablica 2. Usporedba dimenzija nakon sklapanja .....	17
Tablica 3. Dimenzije kolica prije i nakon sklapanja .....	26
Tablica 4. Dimenzije cijevi .....	29
Tablica 5. Svojstva aluminijske legure 6061 T6 [18] .....	34
Tablica 6. Iznosi sila za slučaj opterećenja 1 .....	44
Tablica 7. Iznosi sila za slučaj opterećenja 2 .....	47
Tablica 8. Iznosi sila za slučaj opterećenja 3 .....	49

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$D$	mm	promjer
$t$	mm	debljina stijenke
$l$	mm	duljina
$r_1$	mm	unutarnji polumjer
$r_2$	mm	vanjski polumjer
$G$	mm	težina
$F, F_1, F_2$	N	sila na gredu
$\alpha, \beta, \gamma$	°	kutovi sila
$F_A, F_B, F_C$	N	sile platna
$l_T$	mm	udaljenost težišta
$L$	mm	krak sile
$W$	mm <sup>3</sup>	moment tromosti
$m_{\text{pilot}}$	kg	masa pilota
$E_{\text{kin}}$	J	kinetička energija
$E_p$	J	potencijalna energija
$F_{\text{din}}$	N	dinamička sila
$F_{\text{st}}$	N	statička sila
$k_D$		faktor udara
$w_{\text{din}}$	m	dinamički progib
$w_{\text{st}}$	m	statički progib
$v$	m/s	brzina gibanja jedrilice
$v_v$	m/s	vertikalna brzina gibanja

---

**SAŽETAK**

Tema diplomskog rada je dizajn i razrada mikrolake ovjesne jedrilice s motorom i numerička analiza te konstrukcije.

Povijest zmajarstva, izgled konstrukcije motornih ovjesnih jedrilica te tehnike upravljanja i leta jedrilica opisani su u uvodu rada.

Nakon uvida u stanje tržišta i analizom postojećih proizvoda, definirane su karakteristike koje mikrolake ovjesne jedrilice moraju imati te su prikazana i analizirana rješenja za pojedine konstrukcijske zahtjeve. Na temelju toga osmišljen je koncept mikrolake ovjesne jedrilice koji je modeliran korištenjem programskog paketa *SolidWorks*. Koncept je u nastavku rada detaljno prikazan te je opisan način sklapanja i rastavljanja konstrukcije. Nabrojane su važnosti pravilnog dimenzioniranja cijevi konstrukcije i prikazan je položaj pilota tijekom leta motornom ovjesnom jedrilicom koristeći programski paket *Catia V5*.

U nastavku rada, korištenjem programskog paketa *Abaqus*, provedena je numerička analiza konstrukcije osmišljenog koncepta. Prvo su provjerena naprezanja tijekom leta za više slučajeva opterećenja. Nakon toga analizirana je čvrstoća konstrukcije prilikom slijetanja kada dolazi do udarnog opterećenja.

Na temelju numeričke analize zaključeno je da su pojedine cijevi predimenzionirane te je nakon promjene promjera i debljina stijenki tih cijevi provedena još jedna analiza naprezanja konstrukcije.

U završnom poglavlju dan je zaključak na temelju provedenih numeričkih analiza konstrukcije.

Ključne riječi: *konstruiranje, ovjesna jedrilica, metoda konačnih elemenata, numerička analiza, deformacije, naprezanja*

---

## SUMMARY

The theme of this master thesis is design and development of powered microlight hang glider and numerical analysis of its construction.

The history of hang gliding, design of hang gliders and the techniques for flying are described in the introduction.

After market research and analysis of existing products, the characteristics of microlight hang gliders are defined and solutions for particular design requirements are presented and analyzed. Based on this, the concept of a microlight hang glider was designed and modeled using SolidWorks. The concept is presented in detail and structure assembly as well as disassembly are described. The importance of the correct dimensioning of the structure pipes is described and the position of the pilot during the flight is shown using Catia V5.

In the following, a numerical analysis of the construction was carried out using Abaqus. First, the stresses of the structure during flight were checked for multiple loading cases. Afterwards, the strength of the structure during landing when impact load occurs is analyzed.

On the basis of the numerical analysis of the structural stress, it was concluded that individual pipes were over-dimensioned and, after changing the diameter and wall thickness of these pipes, another structural stress analysis was performed.

The final chapter provides a conclusion based on the numerical analysis of the structure.

Keywords: *design, hang glider, finite element method, numerical analysis, deformations, stresses*

## 1. UVOD

Zmajarstvo (eng. *hang gliding*) je zrakoplovni natjecateljski ili rekreativni sport u kojem pilot leti pomoću ovjesne jedrilice, tzv. zmaja. Moderne jedrilice sastoje se od aluminijskog ili kompozitnog okvira te sintetičke tkanine koja služi kao krilo. Pilot je tijekom leta ovješeno o krilo te se nalazi u vreći u ležećem položaju kao na slici 1 ili u sjedećem položaju ako leti motornom ovjesnom jedrilicom. Jedrilicom se upravlja premještanjem težišta pilota što dovodi do zakretanja jedrilice u željenom smjeru.

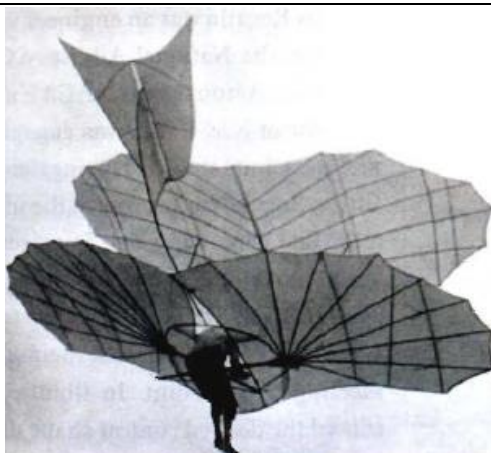


Slika 1. Zmajarstvo [1]

Faktor koji najviše utječe na performanse ovjesne jedrilice je finesa (engl. *glide ratio*). Definira se kao omjer horizontalno prijeđenog puta i vertikalnog propadanja pri mirnom letu ili kao omjer horizontalne i vertikalne brzine jedrilice. Što je taj omjer veći, krila će brže letjeti, ali je upravljivost manja. S današnjim ovjesnim jedrilicama moguće je dostizanje brzine leta i do 140 km/h. Cijene novih ovjesnih jedrilica kreću se od 3 000 do 17 000 eura.

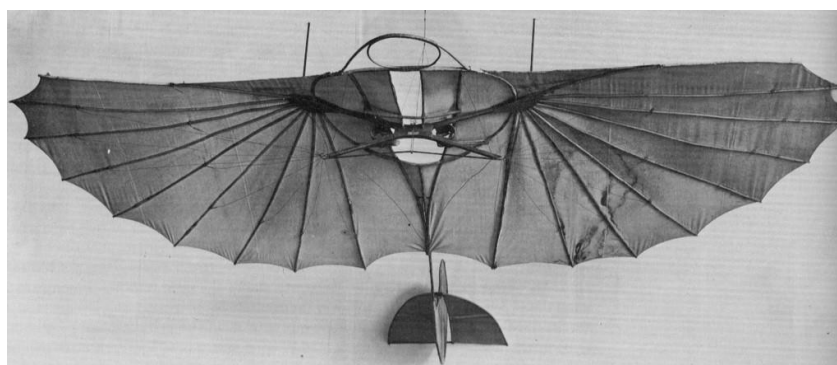
### 1.1 Povijest zmajarstva

Dok su braća Wright zaslužna za prvi zrakoplov koji je mogao uzletjeti s ravnog tla, njemački avijatičar Otto Lilienthal prvi je opisao aerodinamiku ovjesnih jedrilica te su upravo njegovi pokusi uvelike pomogli braći Wright u razumijevanju principa leta. On je tijekom pet godina izgradio i testirao osamnaest različitih modela ovjesnih jedrilica. Na slici 2 prikazan je njegov let ovjesnom jedrilicom dvokrilne konfiguracije.



**Slika 2. Lilienthalov let dvokrilnom jedrilicom [2]**

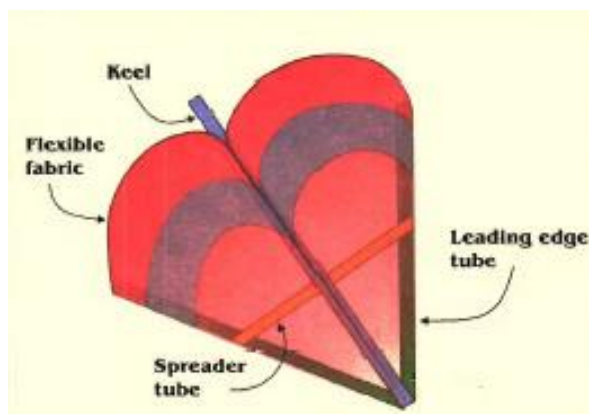
Lilienthalova ideja bila je izraditi dovoljno veliko krilo s kojeg bi čovjek mogao visiti i letjeti. Kako bi se postiglo upravljanje jedrilicom u letu, razmišljao je o premještanju težišta pilota s jedne na drugu stranu što je bila dobra ideja jer se na istom principu upravlja i današnjim ovjesnim jedrilicama. Međutim, za takvo upravljanje potrebna je vještina i snaga. Stoga je za razvijanje potpuno funkcionalne ovjesne jedrilice bilo potrebno eksperimentirati što je sasvim razumljivo s obzirom na činjenicu da tada nije bilo uvida u teoriju aerodinamike. Prvo teorijsko objašnjenje dinamike fluida dao je 1904. Ludwig Prandtl koji je izložio teoriju graničnog sloja. Inženjeri poput Lilienthala nisu čekali potpuna teorijska obrazloženja već su pokušali shvatiti aerodinamiku eksperimentirajući što je mnogo pridonijelo razvoju ovjesnih jedrilica. Nakon njegovih izuma nastala duga pauza u razvoju ovakvih letjelica [2].



**Slika 3. Ovjesna jedrilica Otta Lilienthala [3]**

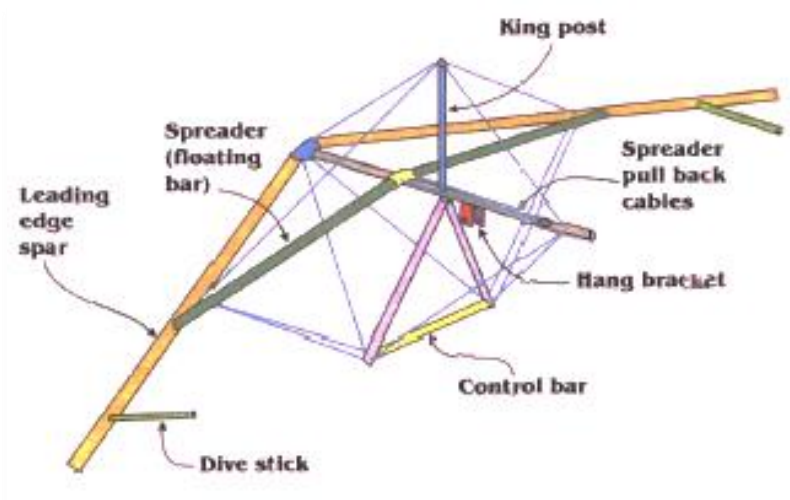
Trebalo je čekati gotovo pola stoljeća do daljnjih napredaka kada je Francis Rogallo dao svoj doprinos dizajnu krila. On je bio inženjer koji je surađivao s Nacionalnim savjetodavnim odborom za zrakoplovstvo (NACA), pretečom NASA-e gdje je radio na dizajnu krila i padobrana. Tijekom ranih pedesetih godina Rogallo je dizajnirao fleksibilno delta krilo jednostavne konstrukcije (Slika 4). Krilo se sastojalo od dva simetrična polukonusna dijela kojima su se vrhovi spajali u jednoj točki. U letu bi stranice poprimile željeni stožasti oblik

zbog tlaka zraka čime su postignuta izvrsna aerodinamička svojstva te je omogućena dobra upravljivost pri vrlo malim brzinama leta. NASA je bila zainteresirana za korištenje ovakvog dizajna krila za misije prizemljenja svemirskih modula. Naime, svemirski moduli su se vraćali na zemlju tako što su slobodno padali i nakon otvaranja padobrana sletjeli u more. Ideja je bila da se pomoću Rogallovog krila modul kontrolirano prizemlji na određenu lokaciju. Iako ova konstrukcija nikada nije usvojena za NASA-ine misije, utkala je put razvoju ovjesnih jedrilica te je, zahvaljujući njenom izumitelju, zmajarstvo danas siguran i popularan sport.



Slika 4. Rogallovo krilo [2]

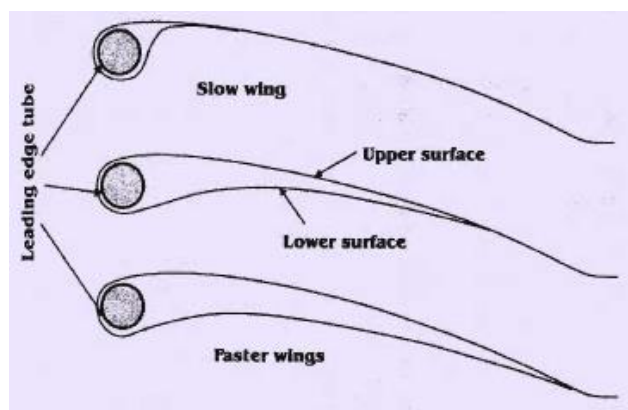
Na slici 5 prikazan je okvir ovjesne jedrilice konstruirane na temelju koncepta Rogallovog krila. Duž rubova krila nalaze se dvije cijevi (eng. *leading edge spar*) koje su jednim krajem međusobno spojene te krilu daju delta oblik. Kobilica se proteže od vrha do repa krila. Konstrukcija se sastoji od još dviju cijevi (eng. *floating bar*) postavljenih simetrično u odnosu na kobilicu koje su jednim krajem spojene na pripadajuću rubnu cijev (eng. *leading edge spar*), dok su drugim krajem međusobno spojene poviše kobilice.



Slika 5. Osnovna konstrukcija krila [2]



Najlonsko platno čvrsto je pričvršćena na rubne cijevi (eng. *leading edge spar*). Povlačenjem kablova povećava se kut između tih cijevi, krilo se širi i platno napinje čime krilo postaje kruće što poboljša aerodinamička svojstva. Što je krilo kruće ovjesna jedrilica ima bolju finesu, ali manju upravljivost. Da bi se dobio oblik krila, tanke cijevi precizno definiranih oblika umetnute su u džepove ušivene u tkaninu. Krilo iz bočnog pogleda može biti jednostavna zakrivljena linija ili imati dvostruku površinu (Slika 6). Što je dvostruka površina veća krilo je brže. Tipično krilo s 30 posto dvostruke površine može letjeti brzinom od oko 50 do 60 km/h. Krila sa 70 do 80 posto dvostruke površine postižu brzinu od oko 70 do 80 km/h.



Slika 6. Aerodinamički profili krila [2]

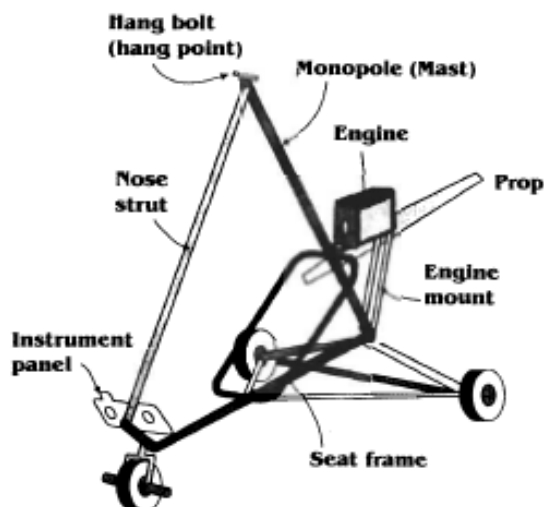
Trokutasti upravljački okvir kruto je pričvršćen za krilo. Horizontalna cijev tog okvira (eng. *control bar*) služi za upravljanje smjerom leta. Na kobilici je postavljeno ovjesište na koje je pričvršćen pojas pomoću kojeg pilot visi te je tijelo paralelno s kobilicom [2].

## 1.2 Ovjesne jedrilice s motorom

### 1.2.1 Osnovna konstrukcija kolica

Kod motornih ovjesnih jedrilica, uz krilo, osnovni dio konstrukcije su i kolica koje služe za prihvat pilota i motora. Tipična izvedba kolica prikazana je na slici 7. Najčešće su izrađena od aluminijskih cijevi. Na konstrukciju su montirani prednji kotač i par stražnjih kotača neophodnih za uzlijetanje i slijetanje. Zakretanjem prednjeg kotača upravlja se kolicima dok se gibaju po tlu. Prednja cijev (eng. *nose strut*) spojena je između stražnje cijevi koja služi za spoj kolica i krila (eng. *mast*) i vodoravno položene cijevi (Slika 7). Okvir sjedala spojen je jednim krajem na stražnju cijev, a drugim krajem na vodoravnu cijev. Jedno ili dva sjedala učvršćena su u okviru sjedala. Za trening se obično koriste kolica s dva sjedala. Bočni raspored sjedala je rijedak što je i razumljivo s obzirom na to da bi se takvim rasporedom povećala ukupna površina

okomita na smjer leta što rezultira većim otporom zraka. Na nosač motora postavljen je motor koji okreće elisu nakon čega kolica dobiju zalet potreban za uzlijetanje.



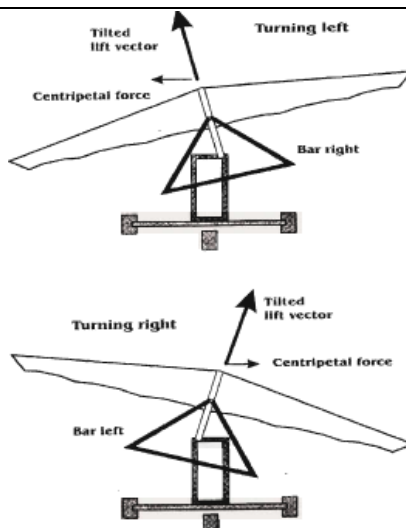
Slika 7. Osnovna konstrukcija kolica [2]

Motornim ovjesnim jedrilicama nisu potrebne duge piste za uzlijetanje. Uglavnom je dovoljna staza do 150 m, a jedrilica obično polijeće unutar 100 m. Otvoreno polje s kratkom travom najpovoljniji je teren za slijetanje i polijetanje zbog toga što pri križanju vjetra slijetanje ovjesnih jedrilica može biti opasno, a otvoreno polje omogućava pilotu da slijetanje obavi kretanjem u smjeru suprotnom od smjera puhanja vjetra [2].

### 1.2.2 Upravljanje letjelicom

Osnovni upravljački mehanizam je trokutasti okvir koji je kruto pričvršćen na krilo. Upravljačka šipka (eng. *Speedbar*) može se pomicati u odnosu na kolica u četiri smjera: naprijed, natrag, lijevo i desno.

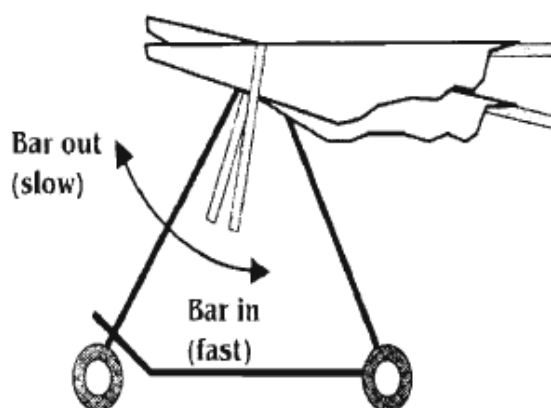
Pomicanjem upravljačke šipke pomiče se položaj krila u odnosu na kolica i pilota, tj. mijenja se položaj težišta kolica i pilota u odnosu na krilo. Na primjer, za izvođenje skretanja u desno, krilo se mora nagnuti desno pomicanjem upravljačke šipke ulijevo (Slika 8).



**Slika 8. Upravljanje lijevo-desno [2]**

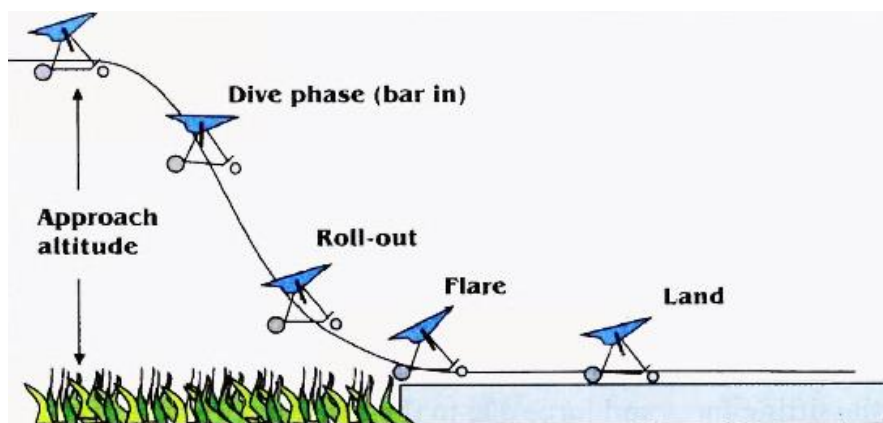
Kada se krilo nagne desno, vektor sile uzgona se također nagnije i pruža potrebnu bočnu silu za zakretanje letjelice. U konvencionalnom zrakoplovu je potrebna dodatna kontrola za okretanje kormila.

Brzina zrakoplova uglavnom se regulira napadnim kutom. To je kut između krila (tetine aeroprofila) i pravca nailazećih strujnica zraka. Ako je krilo zakrenuto tako da prednji dio krila ide prema gore (Slika 9), tada se napadni kut povećava. Time se povećava koeficijent uzgona definiran kao omjer sile uzgona i umnoška dinamičkog tlaka i referentne površine, tj. sile dinamičkog pritiska nadolazećih strujnica zraka. Dinamička sila je polovina produkta gustoće zraka, kvadrata brzine strujanja i referentne površine krila. Površina i gustoća zraka konstantnog su iznosa. Tijekom leta sila uzgona je u ravnoteži s težinom kolica i pilota, stoga se brzina zrakoplova smanjuje kao posljedica povećanja koeficijenta uzgona. Suprotno se događa kada se napadni kut smanji.



**Slika 9. Upravljanje brzinom [2]**

Piloti motornih ovjesnih jedrilica koriste vrstu tehnike slijetanja koja se razlikuje od tehnike korištene u konvencionalnim zrakoplovima. Faze slijetanja prikazane su na slici 10. Slijetanje započinje poravnavanjem kolica s pistom što je bitno izvesti na dovoljno velikoj visini. Zrakoplov nakon toga „zaroni“ (eng. *Dive phase*) čime se brzina kretanja povećava što se postiže povlačenjem upravljačke šipke natrag, smanjujući tako prethodno opisani napadni kut. Kako se ovjesna jedrilica približava tlu, upravljačka se šipka lagano gura prema naprijed što rezultira smanjenjem brzine (eng. *Roll out*). Zatim se upravljačka šipka gura još više prema naprijed što rezultira time da ovjesna jedrilica leti paralelno s pistom te uz dodatno smanjenje brzine sigurno sleti. Ovjesna jedrilica je u *roll-out* fazi tek otprilike jednu sekundu, dok se *flare* faza izvodi u djeliću sekunde. Nakon slijetanja, upravljačka šipka se ponovno povlači prema natrag kako bi se omogućilo aerodinamično kočenje.



Slika 10. Slijetanje [2]

Polijetanje je možda najjednostavniji manevar kod upravljanja ovjesnim jedrilicama. Postoje dvije tehnike: uzlijetanje naglim guranjem upravljačke šipke (eng. *bar out*) i uzlijetanje postepenim guranjem upravljačke šipke uz duže zalijetanje (eng. *bar in*). U *bar out* tehnici, upravljačka se šipka maksimalno gura prema naprijed uz maksimalan gas te motorna ovjesna jedrilica polijeće uz mali zalet. Odmah nakon polijetanja pilot upravljačku šipku malo povuče prema sebi jer bi se u protivnom jedrilica zaustavila. Prilikom korištenja „*bar-in*“ tehnike, gas se dodaje postepeno i upravljačka šipka se lagano gura prema naprijed. Polijetanje ovom tehnikom zahtjeva duži put zalijetanja [2].

### 1.3 Tehnike letenja

Jedrilica se tijekom leta kontinuirano spušta, stoga za postizanje dužeg trajanja leta pilot mora tražiti zračne struje koje se podižu brže od brzine spuštanja jedrilice. Tople rastuće zračne struje posljedica su sunčeve energije koja zagrijava zemlju, a zatim i zrak iznad nje. Topli se zrak

zbog manje gustoće u odnosu na okolni zrak podiže te stvara termalni stup. Tople se struje podižu sve dok se ne formira oblak kumulus. Kada pilot pronade izvor rastućih struja, on kruži unutar područja dizanja zraka kako bi postigao veću visinu. Nakon postizanja određene visine, pilot izlazi iz područja rastućih struja te leti dalje do sljedećeg stupa toplog zraka. Ovakav način leta naziva se jedrenje u termici.

Letenje uz planinu ili brdo moguće je kada vjetar puše prema brdu. Kako zrak struji prema brdu te se struje odbijaju stvarajući uzgon (eng. *Ridge lift*). Ako se odbijeni zrak podiže brže nego što ovjesna jedrilica ponire, pilot može letom pod određenim kutem uz brdo postići veće visine. Treći način kojeg koriste piloti ovjesnih jedrilica su zavjetreni valovi koji se javljaju iznad vrhova planina. Prepreke za protok zraka stvaraju stacionarne valove s naizmjeničnim podizanjima i spuštanjima. Na vrhu svakog vala stvaraju se lentikularni oblaci prema kojima pilot može prepoznati pogodno mjesto za let.

## 2. KONSTRUKCIJA MIKROLAKE OVJESNE JEDRILICE S MOTOROM

Ovjesna jedrilica s motorom sastoji se od Rogallovog krila spomenutog u uvodu i kolica koja služe za prihvat pilota i motora čiji je izgled opisan je u uvodu. Kod postojećih motornih ovjesnih jedrilica kolica se razlikuju po masi konstrukcije, broju sjedišta (jedno ili dva sjedala), načinu na koji su izvedena sjedišta (platno ili kruto sjedalo), profilu cijevi i načinu sklapanja. Kako bi se postigle što bolje performanse ovjesne jedrilice, mogućnost što dužeg letenja i manja potrošnja goriva, ali i mogućnost jedrenja u termici, potrebno je posebnu pažnju posvetiti postizanju male mase cijele konstrukcije. Težinske kategorije ovise o propisima nadležne institucije u pojedinim državama. U Hrvatskoj se mikrolakim ovjesnim jedrilicama smatraju jedrilice strukturalne mase do 80 kg za jednosjed, odnosno do 100 kg za dvosjed uključujući i one koje polijeću s nogu pilota [4]. Na tržištu postoji mnogo različitih izvedbi mikrolakih motornih ovjesnih jedrilica. Oni su većinom osmišljeni, konstruirani i proizvedeni od strane entuzijasta koji se bave zmajarstvom. Većina kolica je slične konstrukcije koje su sklopive ili djelomično rastavljive kako bi smanjenjem dimenzija transport bio olakšan. U nastavku teksta navedeni su neke postojeće konstrukcije na tržištu.

### 2.1 Analiza tržišta

U ovom poglavlju prikazane su postojeće mikrolake motorne ovjesne jedrilice s jednim sjedištem. Izgled konstrukcije kolica ponajviše ovisi o položaju pilota koji može biti sjedeći ili ležeći. Ležeći je položaj identičan položaju pilota prilikom letenja ovjesnom jedrilicom prikazanom na slici 11.



Slika 11. Položaj pilota prilikom letenja ovjesnom jedrilicom [5]

Na slici 12 prikazan je let motornom letjelicom pri kojem pilot ima isti položaj kao na prethodnoj slici. Takvim se položajem i smještajem pilota i motora mogu postići dobra aerodinamična svojstva cijele letjelice te mala masa konstrukcije.



**Slika 12. Ležeći položaj kod motorne ovjesne jedrilice [6]**

Unatoč navedenim prednostima ležećeg položaja pilota, sjedeći je položaj puno udobniji što je bitna karakteristika s obzirom na to da let motornom ovjesnom jedrilicom može trajati satima. Postojeći proizvodi na tržištu većinom imaju sjedeći položaj.

### **2.1.1 Icaro 2000 electric trike**

Icaro 2000 jedan je od važnijih proizvođača ovjesnih jedrilica na svijetu. Dio ponude proizvoda je i motorna ovjesna jedrilica Icaro 2000 dostupna isključivo s električnim motorom. Konstrukcija je prikazana na sljedećoj slici.



**Slika 13. Icaro 2000 [7]**

Kolica pokreće električni motor koji okreće propeler promjera 140 cm. Baterija od 24 Ah osigurava vrijeme leta od oko 20 minuta s krilima RX18 ili RX21 i pilotom od 80 kg dok dvije paralelno povezane baterije (48 Ah) omogućuju vrijeme leta od 40 minuta.

Položaj prednjeg kotača može se prilagoditi (može se postaviti bliže ili dalje sjedalu) kako bi upravljanje kolicima bilo omogućeno pilotima različitih visina.

Dimenzije kolica su sljedeće: visina je 2270 mm, širina 1600 mm, a duljina 2050 mm [7].

Sklopivost konstrukcije omogućena je odvajanjem duge prednje cijevi od ostatka konstrukcije i izvlačenjem cijevi koja služi za spoj kolica s krilom. Pomoću zglobova na okviru sjedišta pilota, cijev na kojoj je pričvršćen nosač motora i motor može se jednostavno preklopiti čime se znatno smanjuju dimenzije kolica bez potrebe odvajanja motora od ostatka konstrukcije. Cijevi stražnjih kotača također se mogu preklopiti nakon čega su dimenzije kolica: visina 920 mm, širina 520 mm, duljina 2020 mm.



Slika 14. Icaro 2000 nakon sklapanja [7]

### 2.1.2 ATF trike

Za razliku od konstrukcije *Icara 2000*, glavne cijevi ATF kolica kvadratnog su presjeka. Kruto sjedalo pilota pričvršćeno je za okvira sjedišta i pilota drži u uspravnom sjedećem položaju. Zbog takvog položaja sjedenja, površina sustava (konstrukcije i pilota) okomita na smjer leta prilično je velika pa nepovoljno utječe na otpora zraka.



Slika 15. ATF kolica [8]



Sklopivost konstrukcije postiže se skidanjem prednje duge cijevi (kao i kod prethodno opisanih kolica *Icaro 2000*) i cijevi na kojoj su montirani nosač motora i motor. Također, sklapaju se i cijevi stražnjih kotača. Razlika u načinu sklapanja u odnosu na *Icaro 2000* je ta što se kod potonjeg izvlači cijev koja spaja kolica s krilima te se tako postiže manja duljina sklopljene konstrukcije.

Duljina nakon sklapanja iznosi 1397 mm, širina 686 mm, a visina 762 mm.



Slika 16. Sklopljena ATF kolica [8]

### 2.1.3 *Aeros Nanolight trike*

*ANT* kolica pokreću motori JPX M25 (25 KS) ili Polini Thor 250 (36 KS). Cijevi koje preuzimaju najveći dio opterećenja kvadratnog su presjeka. Glavna značajka *ANT* kolica su jako male dimenzije nakon sklapanja što transport čini jednostavnijim.



Slika 17. Aeros Nanolight Trike-ANT [9]

Uklanjanjem prednje duge cijevi i cijevi koje spajaju kolica s krilima smanjuje se visina. Za razliku od prethodno opisanih kolica, kod ANT kolica nema preklapanja sjedala, ali se umjesto toga sklapa cijev prednjeg kotača. Također, sklapaju se i cijevi stražnjih kotača, ali bez potrebe uklanjanja pomoćnih tanjih cijevi stražnjih kotača. Na njima se nalazi zglob koji omogućava sklapanje (Slika 18), ne samo za potrebe transporta već i prilikom leta kako bi se smanjio ukupni otpor zraka (Slika 19). Bitno je naglasiti da je, kao i kod Icara 2000, položaj sklopa prednjeg kotača zajedno s papučicama gasa i kočnice podesiv.



**Slika 18.** Zglob za sklapanje pomoćnih cijevi stražnjih kotača [9]



**Slika 19.** Sklopljene cijevi stražnjih kotača tijekom leta [10]

Izgled potpuno sklopljenih kolica prikazan je na sljedećoj slici.



**Slika 20. Sklopljena ANT kolica [9]**

Ovakvim načinom sklapanja postižu se manje dimenzije za transport u odnosu na prethodna kolica i iznose: duljina 1350 mm, širina 550 mm, visina 950 mm.

#### **2.1.4 V-Lite trike**

V-Lite kolica dizajnirana su tako da ukupna masa bude ispod 70 kg što zadovoljava australske propise o „Nanolight“ ovjesnim jedrilicama. Stražnji dio konstrukcije drugačije je konstruiran nego kod prethodno opisanih kolica. Iz slike 21 se vidi da su cijevi stražnjih kotača drugačije postavljene u odnosu na prethodno opisane konstrukcije. Sklapanjem se postiže smanjenje visine dok duljina i širina ostaju.



**Slika 21. V-Lite [11]**

Sjedalo pilota i prostor iza sjedala obloženi su platnom zbog poboljšanja aerodinamičnosti konstrukcije te kako bi prostor iza sjedala mogao biti korišten kao spremnik.

### 2.1.5 Snake trike

Konstrukcija ovih kolica je izrađena od legure 6082 T6, a cijevi stražnjih kotača od materijala Ergal 7075. Ukupna masa, uključujući i ovjesnu jedrilicu je ispod 70 kg.



**Slika 22. Snake kolica [12]**

Ova se kolica sklapaju na sličan način kao prethodno opisani proizvodi. Uklanjanjem prednje duge cijevi te svornjaka iz zgloba koji spaja donju horizontalnu cijev i cijev na kojoj je nosač motora i motor, kolica se preklope preko platnenog sjedala. To je moguće jer nema okvira sjedala, već se na donjoj horizontalnoj cijevi i vertikalnoj cijevi nalazi tanka cijev dužine jednake širini platna. Rastvaranjem kolica, zahvaljujući tim cijevima, platno se napne. Ovakvom izvedbom sjedišta postignuta je manja ukupna masa konstrukcije te jednostavno sklapanje. Također, ova se kolica razlikuju od prethodno navedenih i po izvedbi cijevi stražnjih kotača. Za razliku od većine kolica na tržištu, koji osim glavne cijevi stražnjeg kotača imaju tanju pomoćnu cijev i užadi, kod *Snake trikea* postoje samo cijevi umetnute u cijevi zavarane konstrukcije (Slika 23) i pričvršćene svornjakom. Uklanjanjem tih svornjaka cijevi se jednostavno izvuku umjesto da se sklapaju.



**Slika 23. Rastavljena Snake kolica [12]**

Jednostavnim izvlačenjem cijevi kotača i preklapanjem kolica preko platnenog sjedala postignute su povoljne dimenzije za transport, ali duljina nakon sklapanja ostaje nepromijenjena što je velik nedostatak u odnosu na *ANT* kolica. Konstrukcija ove ovjesne jedrilice drugačija od većine ostalih motornih ovjesnih jedrilica jer nema potrebe za užadi.

## **2.2 Analiza konstrukcijskih zahtjeva**

Pregledom postojećih mikrolakih ovjesnih jedrilica može se zaključiti da je cilj prilikom konstruiranja letjelica postići što manju masu i što veću sklopivost konstrukcije. Također, bitno je da je konstrukcija jednostavna kako bi proizvodnja bila što jeftinija i lakša. Što je izvedba jednostavnija ima manje nepotrebnih dijelova što znači da se pojednostavljuvanjem cjelokupne konstrukcije postiže i manja masa. Veća sklopivost i rastavljivost konstrukcije ujedno znači i veću složenost, ali i veću masu jer zahtjeva zglobove između cijevi stoga je potrebno postići kompromise prilikom ispunjavanja navedenih konstrukcijskih zahtjeva. Važna karakteristika je i aerodinamičnost na koju se, osim oblikom konstrukcije, može utjecati i položajem sjedenja pilota. U sljedećim podnaslovima detaljnije će se opisati najvažniji konstrukcijski zahtjevi.

### **2.2.1 Mala masa konstrukcije**

Kao što je već spomenuto, postizanje male mase konstrukcije važno je da bi se moglo jedriti u termici (vidi 1.3). Takav način leta omogućuje gašenje motora tijekom leta što povoljno utječe na uštedu goriva i znatno povećava trajanje leta. Također, zahvaljujući maloj masi cijele konstrukcije, mogu se koristiti slabiji motori. U konačnici manja masa znači i korištenje manje materijala što proizvodnju čini jeftinijom i jednostavnijom.

Ovaj konstrukcijski zahtjev može se zadovoljiti izborom najboljeg materijala za ovu namjenu. Materijal ovjesnih jedrilica mora imati dobra mehanička svojstva i malu masu. Za izradu se mogu koristiti aluminij, titan, čelik. U sljedećoj tablici prikazana su svojstva navedenih materijala.

**Tablica 1. Usporedba materijala [13]**

Svojstvo	Čelik	Titan	Aluminij
Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	8	4,43	2,7
Modul elastičnosti [GPa]	200	114	68,9
Poissonov faktor [-]	0,3	0,34	0,33
Vlačna čvrstoća [MPa]	420	950	290
Granica elastičnosti [MPa]	350	880	240

Očito je da čelik i titan mogu podnijeti veća naprezanja nego aluminij pa bi cijevi tih materijala bile manjih promjera i debljina stijenke nego aluminijske cijevi. Problem kod čelika je velika specifična težina materijala. Titan ima najpovoljniji odnos gustoće i granice elastičnosti pa bi se korištenjem ovog materijala postigla najmanja masa konstrukcije. Taj se materijal zbog odličnih mehaničkih svojstava sve više koristi kod izrade letjelica, ali je najveći nedostatak visoka cijena. Kompozitni materijali također se mogu koristiti jer imaju odlična mehanička svojstva uz malu masu, ali je nedostatak visoka cijena. Zato se kao najpovoljnije i najjednostavnije rješenje nameće aluminij. Unatoč potrebi za nešto većim dimenzijama, proračunima i provjerom naprezanja cijevi dimenzije se mogu optimirati.

Također se masa može smanjiti uklanjanjem nepotrebnih dijelova te smanjenjem broja cijevi. Jednostavan način za smanjenje mase je korištenje platna umjesto sjedala čime se ujedno postiže i jednostavnije sklapanje.

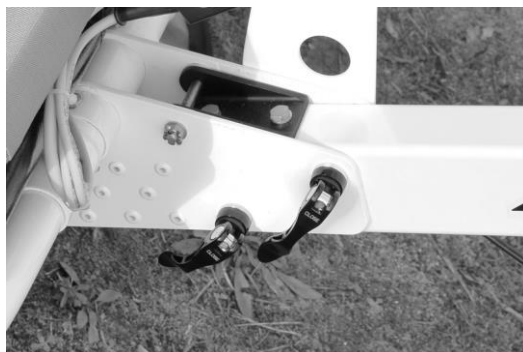
### 2.2.2 Sklopivost i rastavlјivost konstrukcije

Postojeće konstrukcije najviše se razlikuju prema načinu sklapanja i rastavljanja. Razlika u dimenzijama nakon sklapanja kolica opisanih u poglavlju 2.1. prikazana je u sljedećoj tablici.

**Tablica 2. Usporedba dimenzija nakon sklapanja**

	Duljina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]
<i>Icaro 2000</i>	2020	520	920
<i>ATF</i>	1397	686	762
<i>ANT</i>	1350	550	950
<i>V-Lite</i>	2230	1250	1160

Najmanje dimenzije nakon sklapanja imaju *ANT* kolica, ponajviše zahvaljujući zglobu (Slika 24) na donjoj cijevi čijim se preklapanjem znatno smanjuje ukupna duljina.



**Slika 24. Zglob na *ANT* kolicima [9]**

Nedostatak *ANT* kolica je nemogućnost sklapanja okvira sjedala pa je potrebno skidati motor s nosača za razliku od kolica *Icara 2000* kod kojih postoje zglobovi na bočnim cijevima okvira sjedala (Slika 25) koji omogućuju preklapanje nosača sjedala što znatno skraćuje vrijeme potrebno za sklapanje.



**Slika 25. Zglob za sklapanje okvira nosača sjedala [7]**

Sklapanje cijevi stražnjih kotača bitno je za smanjenje širine kolica. Kod *Snake* kolica cijevi stražnjih kotača se izvlače te se ne koristi užad kao kod većine drugih kolica.



**Slika 26. Zglob *Snake* kolica [12]**

Iako je ovakvo rješenje jednostavno, za proizvodnju je jednostavnija uporaba užadi i tanjih pomoćnih cijevi za stražnje kotače. Također, užad ima važnu funkciju kod slijetanja jer se cijevi stražnjih kotača i zglob kojim su spojeni rasterećuju.



**Slika 27. Korištenje užadi [9]**

Da bi transport bio olakšan postizanjem što manjih dimenzija kolica nakon sklapanja potrebno je:

- sklopiti/odvojiti donju cijev za smanjenje duljine,
- sklopiti/odvojiti cijevi stražnjih kotača
- sklopiti/odvojiti cijev koja spaja kolica s krilom.

### 2.3 Izrada koncepta

Pregledom postojećih proizvoda na tržištu i parcijalnih rješenja za određene funkcije motornih ovjesnih jedrilica osmišljen je koncept kolica koji je modeliran u programskom paketu *SolidWorks*.



**Slika 28. Koncept mikrolake ovjesne jedrilice**

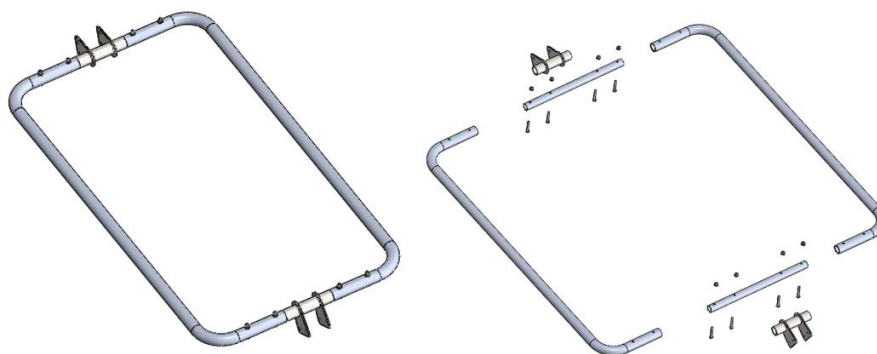


Kolica pogoni benzinski motor. Spremnik goriva nalazi se ispod sjedišta pilota, a za prihvat spremnika služi lim pričvršćen na cijev. Kako bi se postigla bolja aerodinamična svojstva stražnji su kotači prekriveni plastičnim oklopom te je iza prednjeg kotača montiran plastični dio aerodinamičnog oblika. Cijevi su izrađene od aluminijske legure 6061 T6. Za užad će se koristiti Dyneema užad promjera 5 mm čiji je materijal UHMPE (eng. *Ultra High Modulus Polyethylene*). Ovjesna jedrilica prikazana na slici 28 je US 166. Masa kolica bez motora je 19,2 kg.



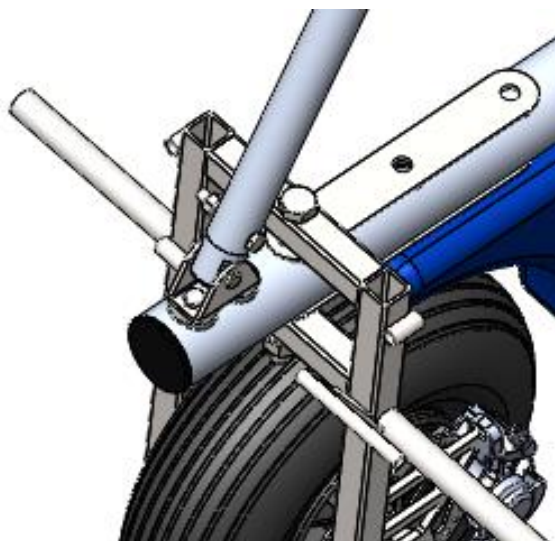
**Slika 29. Koncept kolica mikrolake ovjesne jedrilice**

Okvir sjedala prikazan je na slici 30. Krajevi bočnih cijevi okvira su savijeni te su u njih umetnute ravne cijevi manjeg promjera. Taj je spoj pričvršćen vijcima. Između završetaka bočnih cijevi nalazi se čelična cijev na koju su zavarene ušice kojima je okvir sjedala spojen s cijevima 1 i 3. Čeličnim je cijevima omogućena rotacija oko uzdužne osi.



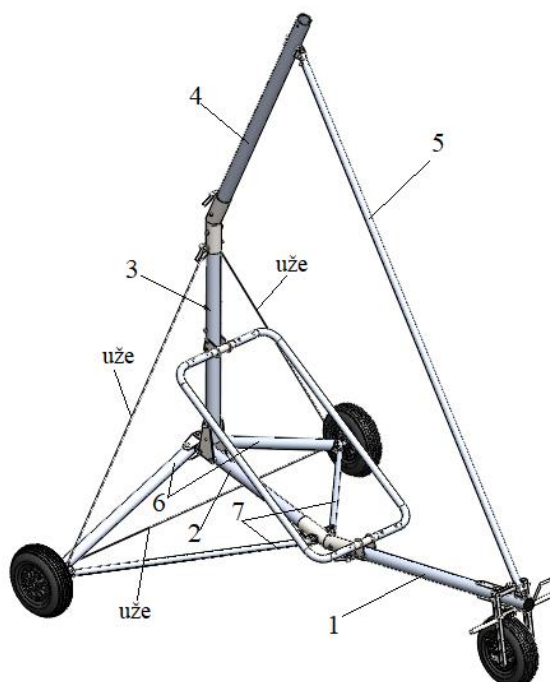
**Slika 30. Okvir sjedala**

Sklop prednjeg kotača na prednjoj cijevi može se postaviti u tri položaja duž prednje cijevi (Slika 31).



**Slika 31. Položaji sklopa prednjeg kotača**

Na slici 32 prikazane su numerirane cijevi zbog lakšeg razumijevanja postupka sklapanja kolica opisanog u nastavku rada.



**Slika 32. Oznake cijevi**

Sklapanje i rastavljanje kolica, nakon uklanjanja ovjesne jedrilice (zmaja), obavlja se sljedećim redoslijedom:

1. odvajanje cijevi 5,
2. izvlačenje cijevi 4,

3. sklapanje okvira sjedala,
4. izvlačenje cijevi 1 zajedno s okvirom sjedala,
5. sklapanje cijevi 3,
6. sklapanje cijevi 6 i 7.

Nakon skidanja zmaja s ovjesišta, odvaja se cijev 5 koja je jednim krajem zglobno povezana s cijevi 1, a drugim krajem s cijevi 4. Povezana je *quick pinovima*, a na isti način su spojene i druge cijevi koje se odvajaju.

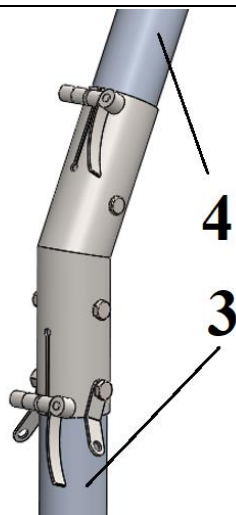


Slika 33. *Quick pin*



Slika 34. Uklanjanje cijevi 5

Nakon uklanjanja cijevi 5, potrebno je izvući cijev 4 umetnutu u zglob sastavljen od dviju zavarenih čeličnih cijevi (Slika 35). Tim su zglobom cijevi 3 i 4 kruto spojene. Krajevi umetnutih cijevi stegnuti su unutar čeličnih cijevi zakretanjem polugice. Cijev 4 dodatno je osigurana svornjakom, dok je cijev 3 s čeličnim zglobom spojena dvama vijcima jer se ta cijev ne izvlači. S donjom cijevi zgloba vijkom su spojene i ušice na koje je prihvaćeno uže. Izgled kolica nakon izvlačenja cijevi 4 prikazan je na slici 36.

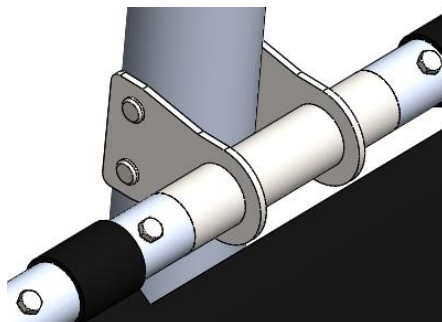


Slika 35. Spoj cijevi 3 i 4



Slika 36. Uklanjanje cijevi 4

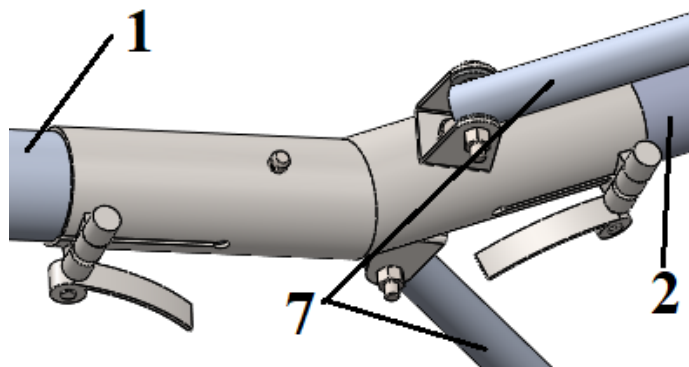
Nakon uklanjanja cijevi 4, okvir sjedala se odvoji od cijevi 3 izvlačenjem dva *quick pina* (Slika 37). Nakon toga okvir sjedala se preklapa preko cijevi 1 (Slika 39).



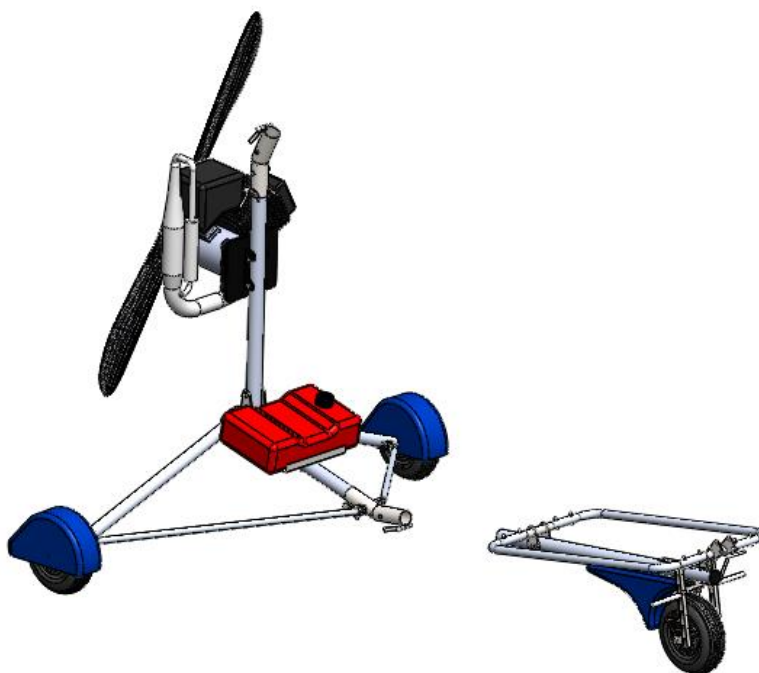
Slika 37. Spoj okvira sjedala i cijevi 3

Kada se okvir sjedala preklopi, cijev 1 se izvlači na isti način kao i cijev 4. Cijevi 1 i 2 umetnute su u čelični zglob sličan onome na slici 35. Cijevi su u čeličnom zglobu stegnute zakretanjem polugice. Cijevi 1 je osigurana svornjakom, a cijev 2 je pričvršćena vijkom koji ujedno pričvršćuje i ušice za prihvat cijevi 7 (Slika 38).

Izgled kolica nakon odvajanja cijevi 1 prikazan je na slici 39.

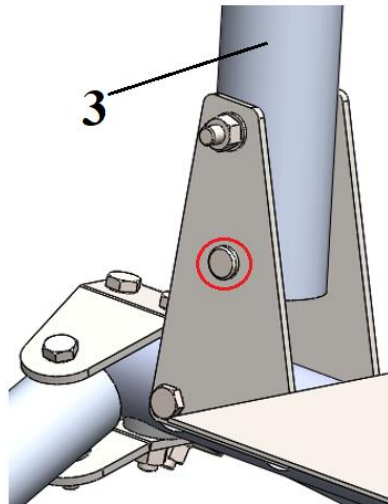


Slika 38. Spoj cijevi 1 i 2

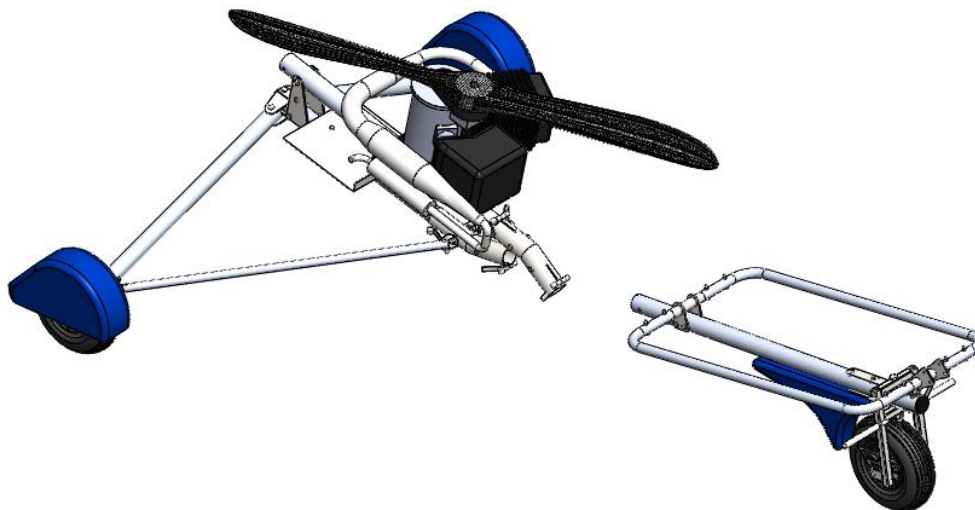


Slika 39. Preklapanje okvira sjedala i odvajanje cijevi 1

Nakon odvajanja cijevi 1 zajedno s okvirom sjedala i sklopom prednjeg kotača, preklapa se cijev 3 (Slika 41). Da bi se to moglo učiniti nužno je ukloniti spremnik goriva i izvući svornjak označen na slici 40.



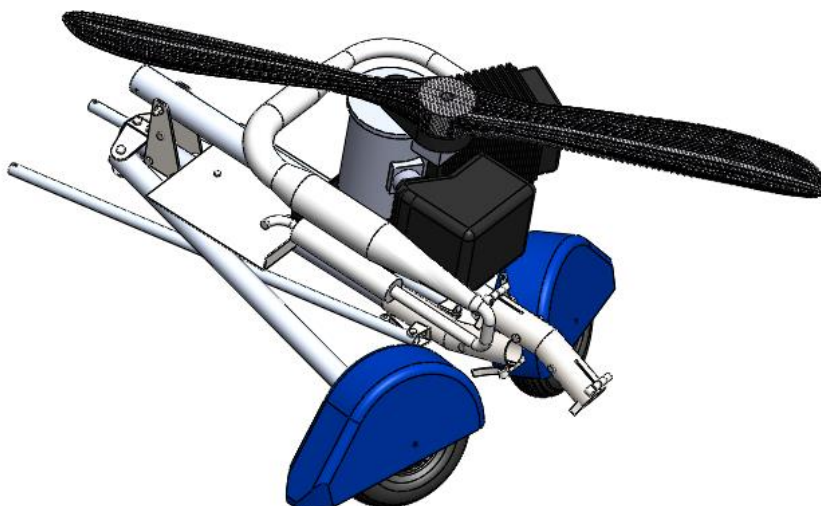
Slika 40. Zglob cijevi 3



Slika 41. Sklapanje cijevi 3

Ovakvim načinom sklapanja cijevi 3 nema potrebe za skidanjem motora što skraćuje vrijeme sklapanja i čini ga jednostavnijim.

Još preostaje sklopiti cijevi 6 (Slika 42). Da bi se to moglo učiniti potrebno je cijevi 7 odvojiti od cijevi 6 izvlačenjem *quick pina* i sklopiti. Na drugom su kraju cijevi 7 zglobno povezane s ušicama na čeličnom zglobu prikazanom na slici 38.



Slika 42. Sklapanje cijevi 6 i 7

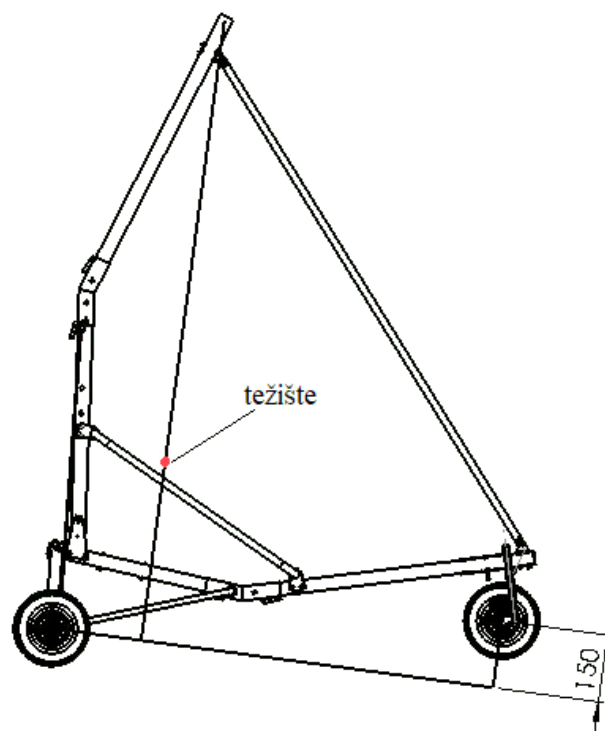
Dimenzije konstrukcije prije i nakon sklapanja prikazane su u tablici.

Tablica 3. Dimenzije kolica prije i nakon sklapanja

	Duljina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]
<b>Prije sklapanja</b>	1925	1554	2246
<b>Nakon sklapanja</b>	1410	803	660

### 2.3.1 Dimenzioniranje konstrukcije

Promjeri i debljine stijenki aluminijskih cijevi mogu se odrediti tek nakon proračuna čvrstoće, odnosno numeričke analize konstrukcije koja će se provesti u sklopu ovog rada. Duljine cijevi najviše ovise o položaju sjedenja pilota te je kolica potrebno dimenzionirati tako da korištenje bude omogućeno pilotima različitih visina, a tome doprinosi i mogućnost promjene položaja sklopa prednjeg kotača duž cijevi 1. Optimalni položaj pilota je polusjedeći jer se postiže udobnost, ali se i smanjuje otpor zraka zbog manje ukupne površine okomite na smjer gibanja. Osim postizanja udobnog položaja za pilote različitih visina, bitno je pozicionirati ovjesište kolica (mjesto spoja kolica i zmaja) tako da prilikom leta prednji kotač bude oko 15 cm viši od stražnjih kotača kako bi se osiguralo da pri slijetanju stražnji kotači prvi dotaknu tlo. Tijekom leta kolica vise o zmaj, stoga zamišljena linija povučena iz ovjesišta prema dolje sječe točku težišta. Linija iz središta stražnjeg kotača okomita na liniju iz ovjesišta mora biti 15 cm udaljena od prednjeg kotača (Slika 43).



**Slika 43. Položaj ovjesišta**

Položaj *speedbara* treba biti takav da ga prilikom uzlijetanja pilot može odgurnuti dovoljno daleko od sebe da se napadni kut poveća i da motorna ovjesna jedrilica poleti (Slika 44). Tijekom leta položaj krila mora biti takav da se postigne napadni kut od  $10^\circ$ .

S obzirom na to da dimenzije, odnosno duljine cijevi, uvelike ovise o antropomjerama, tj. visini pilota, za određivanje i provjeru duljina cijevi korišten je programski paket *Catia V5* zbog mogućnosti korištenja opcije *Human Builder* iz modula *Ergonomics*. Ta opcija omogućuje ubacivanje lutka (*Manikin*) u 3D model čime se provjerava ispunjava li konstrukcija prethodno navedene zahtjeve za položaja pilota.

Dimenzije su provjerene ubacivanjem lutka visine 160 cm, 180 cm i 200 cm.

Ovisno o visini pilota, mijenjan je položaj prednjeg kotača. Tako je za pilote visine od 160 cm do 175 cm predviđen položaj najbliži sjedalu, za pilote visine od 175 cm do 190 cm srednji položaj te za pilote visine preko 190 cm krajnji položaj. Položaj pilota prikazani su na sljedećim slikama.





Slika 44. Položaj sjedenja pilota visine 200 cm



Slika 45. Položaj sjedenja pilota visine 180 cm



Slika 46. Položaj sjedenja pilota visine 160 cm

Bitno je naglasiti da su cijevi kolica, osim prema antropomjerama pilota, dimenzionirana i prema dimenzijama ovjesne jedrilice (zmaja) US 166 prikazane na prethodnim slikama i na slici 28. Materijal svih cijevi je aluminijska legura 6061 T6, stoga dimenzije prikazane u tablici odgovaraju standardnim dimenzijama cijevi od tog materijala (preuzetih iz [14]) preračunatih iz inča u milimetre. Dimenzije cijevi koje će se proračunavati u nastavku rada prikazane su u tablici 4 gdje su bočne cijevi okvira sjedala numerirane sa 1, a središnje cijevi okvira sa 2.

**Tablica 4. Dimenzije cijevi**

<b>Cijevi</b>	<b>Količina</b>	<b>Vanjski promjer <math>D</math> [mm]</b>	<b>Debljina stijenke <math>t</math> [mm]</b>	<b>Duljina <math>l</math> [mm]</b>
<b>1</b>	1	50,8	3,175	900
<b>2</b>	1	50,8	3,175	670
<b>3</b>	1	44,45	3,175	850
<b>4</b>	1	44,45	3,175	1130
<b>5</b>	1	25,4	2,1082	1880
<b>6</b>	2	41,275	2,1082	660
<b>7</b>	2	19,05	2,1082	815
<b>cijev okvira sjedala 1</b>	2	25,4	3,175	1190
<b>cijev okvira sjedala 2</b>	2	19,05	2,1082	310

### 3. PRORAČUN KONSTRUKCIJE KOLICA MIKROLAKE OVJESNE JEDRILICE

#### 3.1 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je suvremena numerička metoda za rješavanje problema rubnih vrijednosti temeljena na fizičkoj diskretizaciji prostora. Ta ideja nastala sredinom prošlog stoljeća, razvojem tehnologije i računala danas sve više dolazi do izražaja. Razmatrani prostor s beskonačno stupnjeva slobode gibanja dijeli se na konačan broj područja koja se nazivaju konačni elementi. Elementi su međusobno povezani čvorovima. Za svaki element pretpostavlja se rješenje zadane diferencijalne jednadžbe u obliku interpolacijskih funkcija koje povezuju zavisne varijable s njihovim vrijednostima u čvorovima. Izvodi se sustav algebarskih jednadžbi čije su nepoznanice čvorne veličine, a nakon toga se formira globalni sustav jednadžbi za cijeli diskretizirani model, u kojemu su nepoznanice čvorne vrijednosti svih elemenata diskretiziranog područja. Ako su konačni elementi pravilno formulirani, s povećanjem ukupnog broja elemenata, odnosno stupnjeva slobode, raste i točnost rješenja. Ova je metoda jedna od najraširenijih numeričkih metoda u inženjerskoj praksi. Postoji veliki broj računalnih alata temeljenih na ovoj metodi koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje same konstrukcije. S obzirom na to da je riječ o numeričkoj metodi, važno je napomenuti da su sva rješenja približna pa je samo uz pravilan odabir proračunskog modela i konačnih elemenata moguće se približiti točnom rješenju [15].

Za numeričku analizu konstrukcije kolica mikrolake ovjesne jedrilice u programskom paketu *Abaqus* koristit će se gredni prostorni elementi za cijevi te štapni prostorni elementi za užad.

##### 3.1.1 Odabir štapnog elementa

Štapni elementi koriste se za modeliranje vitkih linijskih struktura koje prenosi opterećenje isključivo uzduž središnje osi elementa, a momenti i sile koje djeluju okomito na os elementa se ne prenose. Pogodni su za modeliranje kablova ili užadi [16].

U numeričkom modelu korišteni su štapni konačni elementi T3D2 za izračun naprezanja i deformacije užadi. Slovo T u nazivu označava štapni element (eng. *Truss*), oznaka 3D znači da se radi o prostornom elementu, a broj 2 da element ima dva čvora. Svako od užadi bit će dodijeljen jedan T3D2 konačni element.

### 3.1.2 Odabir grednog elementa

Prilikom diskretizacije grednim konačnim elementima, programski paket *Abaqus/CAE* povodi se teorijom greda koja nalaže da su dimenzije poprečnog presjeka grede male u usporedbi s aksijalnim dimenzijama grede [17].

*Abaqus* u bazi podataka ima mnogo grednih elemenata, uključujući Euler-Bernoullijeve i Timoshenkove tipove greda s punim, tankostjenim zatvorenim ili otvorenim presjecima. Iz *Abaqus/Standard* baze podataka moguće je izabrati [16]:

- Euler-Bernoullijeve (tanke) grede u ravnini i u prostoru,
- Timoshenkove (posmično fleksibilne) grede u ravnini i prostoru,
- linearnu, kvadratnu i kubičnu interpolacijsku formulaciju grednih elemenata,
- grede s otvorenim presjecima koje koriste teoriju savijanja otvorenih presjeka,
- cijevne elemente,
- hibridnu formulaciju greda koja se obično koristi kod jako krutih greda koje se značajno rotiraju (upotreba u robotici ili u jako fleksibilnim strukturama kao što su pomorski cjevovodi).

#### 3.1.2.1 Timoshenkove grede

Timoshenkove (posmično fleksibilne) grede (B21, B22, B31, B31OS, B32, B32OS, PIPE21, PIPE22, PIPE31, PIPE32, i njihovi hibridni ekvivalenti), za razliku od Euler-Bernoullijevih greda, opisuju poprečne posmične deformacije. Osim za modeliranje tankih greda, pogodne su i za modeliranje debelih greda kod kojih posmična deformacija ne smije biti zanemarena. *Abaqus*ova analiza pomoću Timoshenkovih greda temelji se na pretpostavci da je poprečno posmično ponašanje grede linearno elastično s konstantnim modulima, neovisno o odzivu presjeka grede na aksijalno rastezanje i savijanje. Mogu biti opterećene velikim uzdužnim opterećenjima dok je za kombinaciju uzdužnog i torzijskog opterećenja, točne rezultate torzijskih posmičnih deformacija moguće dobiti jedino ako uzdužne deformacije nisu prevelike [17].

#### 3.1.2.2 Euler-Bernoullijeve grede

Euler-Bernoullijeve grede ne opisuju poprečne posmične deformacije, tj. ravnine poprečnih presjeka koje predstavljaju normale na uzdužnu os grede i dalje ostaju ravne (ukoliko nema deplancije poprečnog presjeka) i okomite na os grede. Koriste se samo za modeliranje tankih greda gdje poprečni presjeci greda trebaju biti mali u usporedbi s karakterističnim dimenzijama

duž osi (kao što je udaljenost između oslonaca). Euler-Bernoullijevi gredni elementi koriste kubnu interpolacijsku funkciju što ih čini prihvatljivo točnima za slučajeve kod kojih je opterećenje raspodijeljeno duž grede pa su prikladni i za opisivanje dinamičkih vibracijskih slučajeva gdje D'Alembertove, tj. inercijske sile stvaraju upravo takva opterećenja [17].

S obzirom na to da su promjeri cijevi konstrukcije motorne mikrolake ovjesne jedrilice prikazane u podnaslovu 2.3 mali u odnosu na duljine cijevi, može se pretpostaviti da će ravnine poprečnih presjeka ostati ravne i okomite na uzdužnu os grede pa su u numeričkom modelu korišteni gredni konačni elementi B33, tj. prostorni elementi kubne interpolacije.

### 3.1.2.3 Definicija poprečnog presjeka

Poprečni presjeci koji se nalaze u *Abaqus* bazi podataka [16] su:

- puni poprečni presjeci,
- zatvoreni tankostjeni presjeci,
- otvoreni tankostjeni presjeci,
- cijevi s debelom stijenkom.

Izbor punog ili otvorenog poprečnog presjeka utječe na izračun normalnih i posmičnih naprezanja u točkama poprečnog presjeka. Ravnina punih poprečnih presjeka uslijed savijanja ostaje ravna, dok će se uslijed torzijskog opterećenja bilo koji neokrugli poprečni presjek izvitoperiti, tj. poprečni presjek neće ostati ravan. Međutim, za pune poprečne presjeke takvo je iskrivljenje dovoljno malo da se uzdužne deformacije mogu zanemariti i može se primijeniti St. Venantova teorija savijanja bez velikih posljedica na konačne rezultate. U *Abaqusu* se nepuni poprečni presjeci tretiraju kao tankostjeni, odnosno kao presjeci u čijoj je ravnini širina stijenke mala u usporedbi s ostalim dimenzijama poprečnog presjeka. Tankostjena teorija greda razlikuje način računanja posmičnih naprezanja ovisno o tome je li presjek otvoreni ili zatvoreni. Formulacija zatvorenih presjeka koja se koristi u *Abaqusu* temelji se na pretpostavci da se kod dovoljno malih debljina stijenke posmična naprezanja kroz debljinu stijenke ne mijenjaju značajno. Kod otvorenih presjeka se pretpostavlja da se posmično naprezanje linearno mijenja kroz debljinu stijenke, a na sredini je jednako nuli [17].

*Abaqus/CAE* nudi definiranje profila grede na tri različita načina:

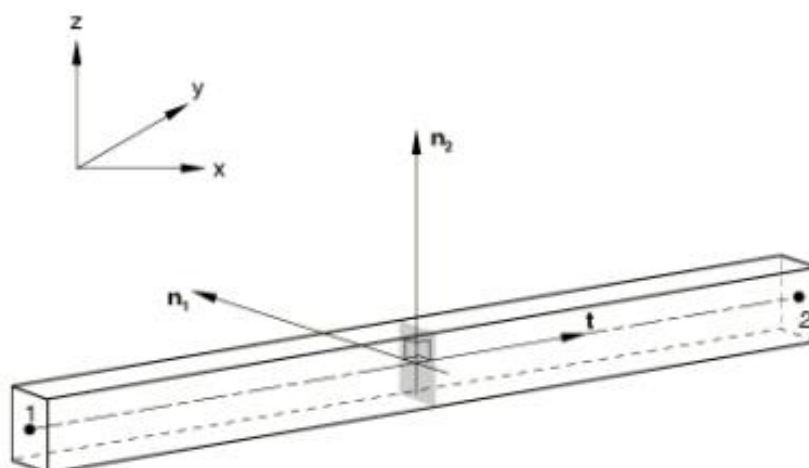
- odabirom poprečnog presjeka iz baze podataka *Abaqus/CAE* i određivanje oblika i dimenzija presjeka grede,
- definiranje pomoću generaliziranog profila grede upotrebom inženjerskih svojstava poprečnog presjeka kao što su površina i moment inercije poprečnog presjeka,

- definiranje pomoću mreže posebnih dvodimenzijskih elemenata za koje se numerički izračunavaju geometrijske veličine.

U ovom će se radu definiranje profila grede izvršiti na prvi navedeni način, tj. odabirom poprečnog presjeka iz baze podataka *Abaqus/CAE* i upisivanjem dimenzija poprečnog presjeka grede. Kako se radi o cijevima, upisat će se promjeri i debljine stijenke iz tablice 4. Kada se gredi dodijeli poprečni presjek definiran na prethodni način, *Abaqus/CAE* nudi opciju računanja inženjerskih svojstava poprečnog presjeka tijekom analize ili na početku same analize pri čemu se prva opcija može koristiti za linearno i za nelinearno ponašanje materijala, dok je druga opcija uglavnom namijenjena za linearno elastične materijale. Odabirom opcije računanja svojstava poprečnog presjeka tijekom analize, *Abaqus/CAE* izračunava odziv grede u nizu točaka koje se nalaze po površini poprečnog presjeka pa se izlazni podaci kao što su naprezanja i deformacije mogu izračunati u bilo kojoj točki tog presjeka [17].

#### 3.1.2.4 Orijentacija poprečnog presjeka grede

Prilikom definiranja svojstava konačnog elementa iznimno je važno odrediti orijentaciju poprečnog presjeka grede u odnosu na globalni Kartezijev koordinatni sustav kao što je prikazano na slici 31. Lokalna tangenta duž elementa grede  $t$  definirana je kao vektor uzduž osi elementa koji je usmjeren od prvog čvora prema sljedećem čvoru pri čemu je poprečni presjek grede okomit na tako definiranu lokalnu tangentu. Vektori  $n_1$  i  $n_2$  definiraju lokalne smjerove poprečnog presjeka. Uz lokalnu tangentu  $t$  i vektore  $n_1$  i  $n_2$  u potpunosti je definiran lokalni desnokretni koordinatni sustav grednog elementa [17].



Slika 47. Orijentacija poprečnog presjeka [16]

### 3.2 Analiza naprežanja u letu

Numerička analiza provedena je za slučaj opterećenja kada ovjesna jedrilica leti te za dinamičko opterećenje u trenutku slijetanja jedrilice.

Materijal cijevi je aluminijska legura 6061 T6 čija su mehanička svojstva prikazana u tablici 5.

**Tablica 5. Svojstva aluminijske legure 6061 T6 [18]**

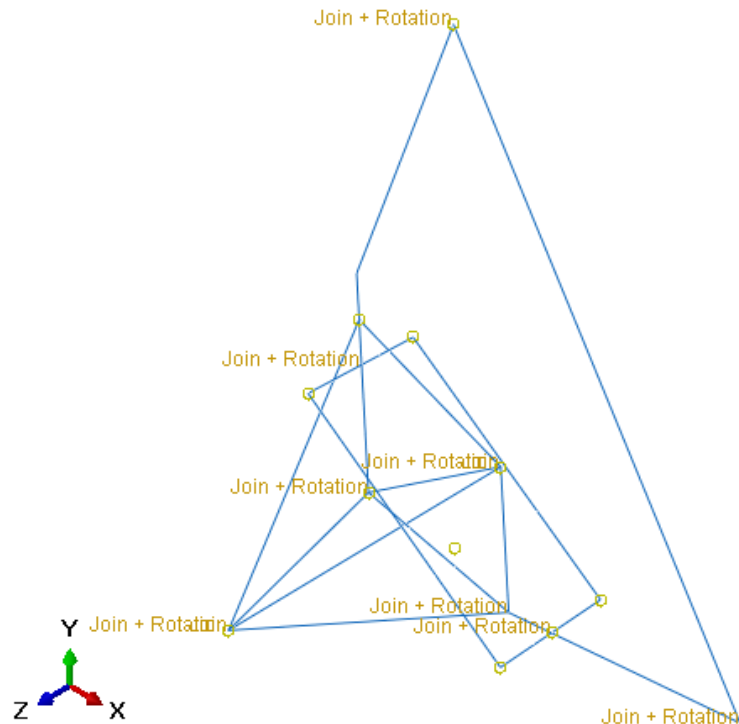
<b>Gustoća [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,7
<b>Modul elastičnosti [GPa]</b>	68,9
<b>Poissonov faktor [-]</b>	0,33
<b>Vlačna čvrstoća [MPa]</b>	290
<b>Granica elastičnosti [MPa]</b>	240
<b>Dinamička izdržljivost [MPa]</b>	96,5

Materijal Dyneema užadi je UHMPE (eng. *Ultra High Modulus Polyethylene*) čiji je modul elastičnosti 113 GPa [19]. Važno je naglasiti da se uže u programskom paketu *Abaqus* modelira kao štap, ali je kod kreiranja materijala bitno uključiti opciju *No compression* jer za razliku od štapova, užad prenosi isključivo vlačna opterećenja.

Kod modeliranja 3D žičanog modela, ukoliko se radi o gredama kao što je to slučaj kod analiziranog modela u ovom radu, spojevi između žica, odnosno cijevi su kruti. Zbog toga su sve cijevi koje se zglobno spajaju s ostatkom konstrukcije modelirane kao zaseban *Part*, dok su cijevi 1 i 2 te 3 i 4 modelirane kao jedan *Part*. Razlog tomu je kruti spoj između tih cijevi prikazan u podnaslovu 2.3.

Poprečni presjeci su dodijeljeni cijevima prema tablici 4.

Da bi se sve cijevi i užad međusobno povezali, u modulu *Interaction* između krajeva cijevi koji se međusobno spajaju, korištenjem opcije *Create Wire Feature* kreirane su žice kojima su nakon toga opcijom *Create Connector Assignment* dodijeljene veze kreirane korištenjem opcije *Create Connector Section*. Svim zglobovima su, ovisno o njihovom položaju i spoju cijevi, definirani dozvoljeni pomaci i rotacije. Veze između cijevi prikazane su na slici 48.



**Slika 48. Veze između cijevi**

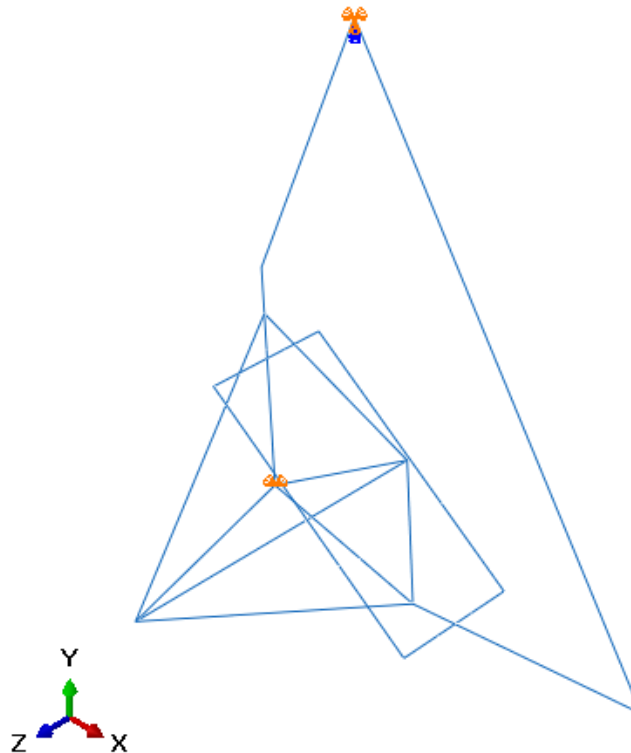
Svi spojevi označeni s *Join+Rotation* su zglobni spojevi modelirani prethodno opisanim postupkom.

Tijekom leta kolica su ovješena o zmaj i opterećena su s težinom cijevi kolica, motora, spremnika goriva, kotača i pilota.

### 3.2.1 Rubni uvjeti pomaka tijekom leta

Tijekom leta kolica su ovješena o zmaj u osloncu A. U tom osloncu onemogućeni su pomaci u sva tri smjera, te je onemogućena rotacije oko globalne osi Y. Rotacije oko osi Z i X su dozvoljene jer se rotacijom oko osi Z regulira brzina leta, a rotacijom oko osi X se upravlja smjerom leta (vidi 1.2.2). U osloncu B ograničeni su pomaci u smjeru X i Z kako bi se izbjegli pomaci krutog tijela.





Slika 49. Rubni uvjeti tijekom leta

### 3.2.2 Opterećenje konstrukcije tijekom leta

Kako bi rezultati analize bili što pouzdaniji, potrebno je definirati opterećenja u *Abaqusu* tako da što bolje opisuju stvarno opterećenje konstrukcije. Sve težine koje opterećuju konstrukciju i njena vlastita težina u ravnoteži su sa silom uzgona. Za svaku od komponenti konstrukcije koja svojom težinom opterećuje konstrukciju kreirana je zasebna sila. S obzirom na to da tijekom nagle promjene smjera kretanja i prilikom turbulencija sile na konstrukciju mogu biti višestruko veće od same težine, one se množe s faktorom  $S=5$  kako bi bili na strani sigurnosti.

Sile koje djeluju na konstrukciju su:

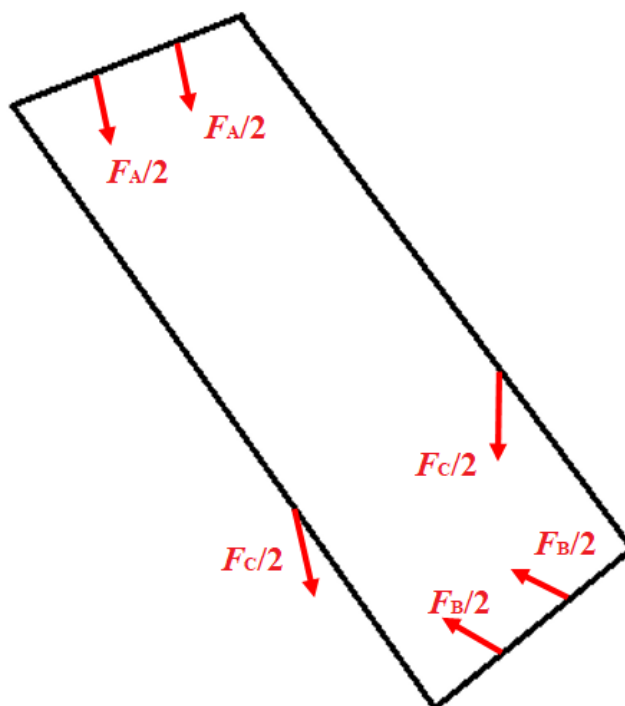
- težina motora,
- težina spremnika goriva,
- težina kotača,
- težina pilota,
- težina cijevi i spojeva.

Hvatište sila težine kotača i spremnika goriva lako se može smjestiti na same cijevi modela u *Abaqusu* za razliku od sila težine motora i pilota koje djeluju izvan same konstrukcije.

Pilotove su noge tijekom leta oslonjene na sklop prednjeg kotača te se dio pilotove težine prenosi na taj dio konstrukcije. Može se pretpostaviti da je to samo 5% pilotove težine što znači da 95% težine djeluje na platno. Taj dio težine od 95% težine pilota u nastavku rada nazivat će se sila pilota. Platno je na okvir sjedala povezano na više mjesta stoga se sila pilota prenosi na okvir sjedala. Okvir sjedala zglobno je povezan s cijevima 1 i 3 te se preko tih spojeva opterećenje prenosi na te cijevi, a posljedično i na ostatak konstrukcije. Također je bitno uzeti u obzir da pilot sjedi i na cijevi 2 te se u stvarnosti značajan dio pilotove sile prenosi direktno na tu cijev. S obzirom na to da je sila pilota najveće, a time ujedno i najutjecajnije opterećenje, radi pouzdanosti rješenja numerička analiza će se provesti za tri slučaja opterećenja:

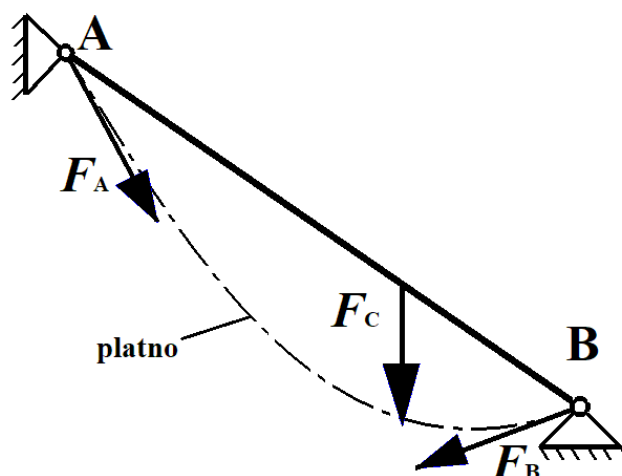
1. svu silu pilota preuzima okvir sjedala,
2. svu silu pilota preuzima cijev 2,
3. 80% sile pilota preuzima cijev 1, a ostatak preuzima okvir sjedala.

Za slučaj 1 i 3 bitno je definirati iznose sila kojima je preko platna opterećen okvir sjedala. Platno je pojasima povezano s okvirom na više mjesta, najčešće na dva mjesta na svakoj cijevi okvira. S obzirom na to da pojasi imaju određenu širinu, opterećenje se čak može opisati kao kontinuirano opterećenje koje djeluje na cijevi okvira sjedala. U ovom proračunu pretpostavljeno je da na donjoj i gornjoj cijevi okvira sjedala djeluju po dvije sile istih iznosa, a da na bočnim cijevima djeluje samo jedna sila kako bi bili na strani sigurnosti.



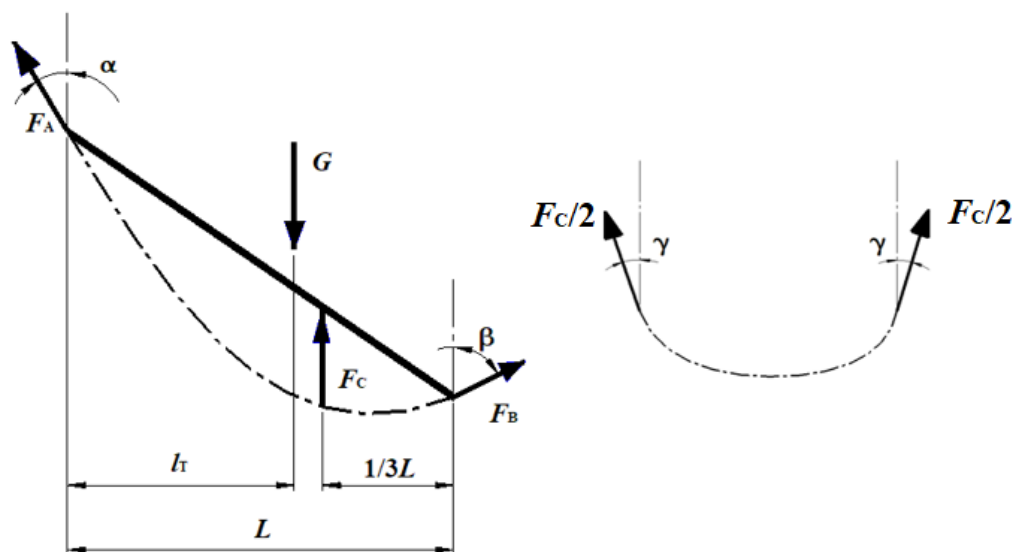
Slika 50. Sile platna na okvir sjedala u 3D pogledu

Kako je okvir sjedala zglobno povezan s cijevima 1 i 3, dobije se sustav prikazan na slici 36.



Slika 51. Sile platna

Ovo je statički neodređen problem, osim ukoliko se pretpostavi da se horizontalne komponente sila na krajevima platna (sile  $F_A$  i  $F_B$ ) međusobno poništavaju. To dakako nije u potpunosti realno jer postoji deformacija okvira sjedala kao i pomaci samih oslonaca zbog deformiranja cijelih kolica, ali će se ta pretpostavka uzeti u obzir zbog lakšeg analitičkog proračuna.



Slika 52. Sile platna i kutovi

Kutovi pod kojim djeluju sile platna prikazani na prethodnoj slici su:

$$\alpha = 22^\circ, \quad (3.1)$$

$$\beta = 77^\circ, \quad (3.2)$$

$$\gamma = 15^\circ. \quad (3.3)$$

Jednadžbe sustava dobivenog iz slike 52 glasi:

$$\sum F_H = 0,$$

$$F_A \sin \alpha - F_B \sin \beta = 0, \quad (3.4)$$

$$\sum F_V = 0,$$

$$F_A \cos \alpha + F_B \cos \beta + F_C \cos \gamma = 0,95 \cdot m_{\text{pilot}} \cdot g \cdot S, \quad (3.5)$$

$$\sum M_A = 0,$$

$$F_B \cos \beta \cdot L + F_C \cos \gamma \cdot \frac{2}{3} L = 0,95 \cdot m_{\text{pilot}} \cdot g \cdot S \cdot l_T, \quad (3.6)$$

gdje su:

$$S = 5, \quad (3.7)$$

$$m_{\text{pilot}} = 80 \text{ kg}. \quad (3.8)$$

Iz gore navedenih jednadžbi dobiju se sljedeći rezultati za slučaj kada svu silu pilota preuzima okvir sjedala:

$$F_A = 405,4 \text{ N}, \quad (3.9)$$

$$F_B = 155,86 \text{ N}, \quad (3.10)$$

$$F_C = 3433,8 \text{ N}. \quad (3.11)$$

Za slučaj opterećenja kada okvir sjedala preuzima 20% sile pilota iznosi sila su:

$$F_A = 81,1 \text{ N}, \quad (3.12)$$

$$F_B = 31,17 \text{ N}, \quad (3.13)$$

$$F_C = 686,76 \text{ N}. \quad (3.14)$$

Također, u ovom slučaju cijev 2 preuzima 80% sile pilota i ta sila iznosi:

$$F_D = 2982,24 \text{ N}. \quad (3.15)$$

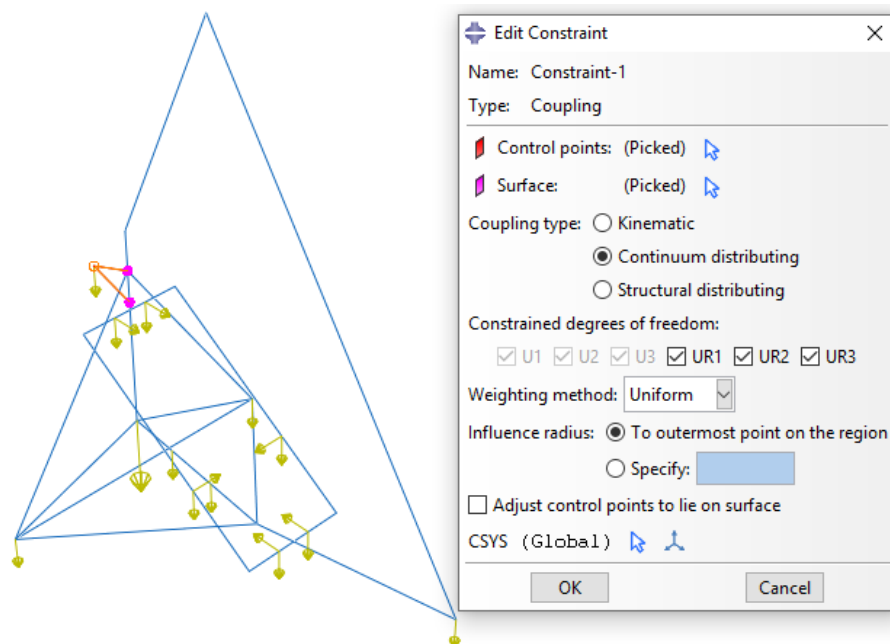
U slučaju kada cijev 2 preuzima svu silu pilota sila  $F_D$  iznosi:

$$F_D = 3727,8 \text{ N}. \quad (3.16)$$

Na ovaj način sila pilota prenijeta je na više točaka konstrukcije. Sila motora postavljena je izvan konstrukcije u referentnu točku (eng. *Reference Point*) čiji položaj odgovara težištu motora te je s ostatkom konstrukcije povezana opcijom *Coupling* čija je primjena detaljnije pojašnjena u sljedećem podnaslovu.

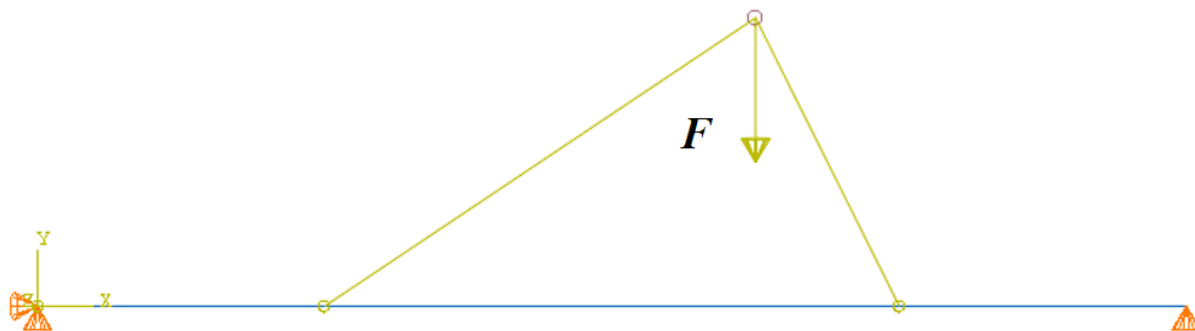
## 3.2.2.1 Opcija Coupling

Sila motora je koncentrirana sila koja je s ostatkom konstrukcije povezana opcijom *Coupling* iz izbornika *Create Constraint* u modulu *Interaction*. Ta opcija omogućuje raspodjelu sile na više točaka. Sila se potom opcijom *Coupling* prenosi na dvije točke na cijevi 3.



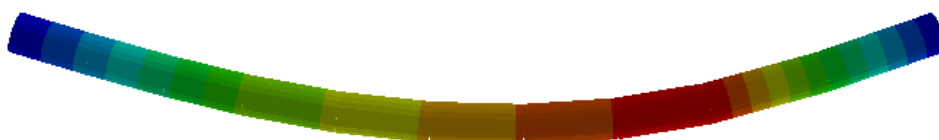
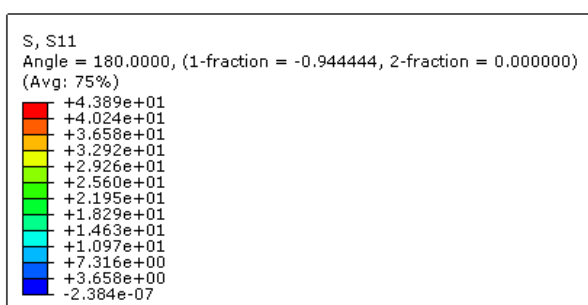
Slika 53. Primjena opcije *Coupling*

Primjena opcije *Coupling* prikazana na primjeru grede duljine  $l = 1000$  mm profila 45x2,5 mm oslonjene na oba kraja. Opterećenje te grede prikazano je na slici 39. Sila  $F$  postavljena je u referentnu točku ( $x_F = 625$  mm). Referentna točka zatim je opcijom *Coupling* povezana s dva čvora. Prvi čvor nalazi se na udaljenosti  $x_1 = 250$  mm, a drugi na  $x_2 = 750$  mm. Za tip veze (*Coupling Type*) odabran je *Continuum distributing* i kao *Weighting method* – *uniform*. Na taj način sila će se raspodijeliti s težinskim faktorom jedan na odabrana dva čvora, tj. u svakom će čvoru biti sila iznosa obrnuto proporcionalnog udaljenosti sile  $F$  od čvora.



Slika 54. Greda opterećena silom  $F$

Normalna naprezanja prikazana su na slici 40.

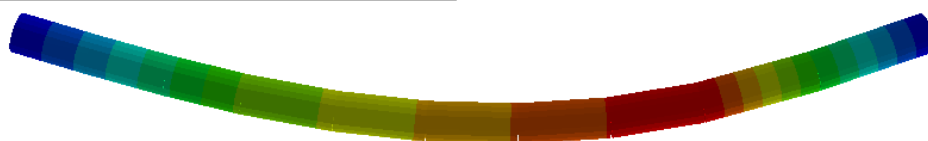
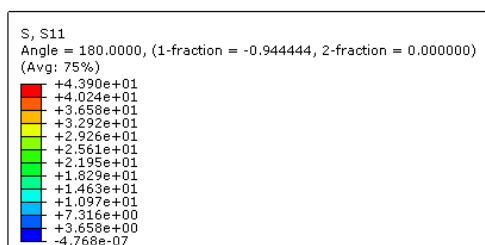


**Slika 55.** Normalna naprezanja grede opterećene silom  $F$

Kako bi se provjerila točnost opcije *Coupling*, provest će se dodatni proračun. Sila  $F=1000$  N djeluje 375 mm udaljeno od sile  $F_1$  i 125 mm udaljeno od sile  $F_2$ . S obzirom na te udaljenosti, greda će se opteretiti s dvije koncentrirane sile iznosa:  $F_1 = 250$  N i  $F_2 = 750$  N. Opterećenje je prikazano na slici 41, a naprezanja na slici 42.



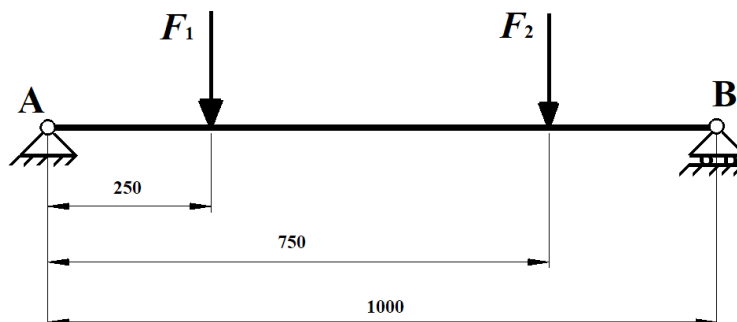
**Slika 56.** Greda opterećena silama  $F_1$  i  $F_2$



**Slika 57.** Normalna naprezanja grede opterećene silama  $F_1$  i  $F_2$

Usporedbom slike 40 i slike 42 jasno se vidi da su naprezanja u gredi jednaka.

Dobivena rješenja još će se usporediti s analitičkim proračunom prema slici 43.



**Slika 58. Analogni proračun grede**

Opterećenje, geometrija i rubni uvjeti isti su kao na slici 41. Jednadžbe su:

$$\sum M_A = 0,$$

$$F_1 \cdot 250 + F_2 \cdot 750 - F_B \cdot 1000 = 0 \quad (3.17)$$

Iz navedene jednadžbe dobije se sila  $F_B$  koja djeluje u osloncu B i iznosi 625 N. Najveće normalno naprezanje je na mjestu  $x=750$  mm.

Moment tromosti iznosi:

$$W = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4) \cdot \frac{1}{y_{sr}} = 3558,835 \text{ mm}^3. \quad (3.18)$$

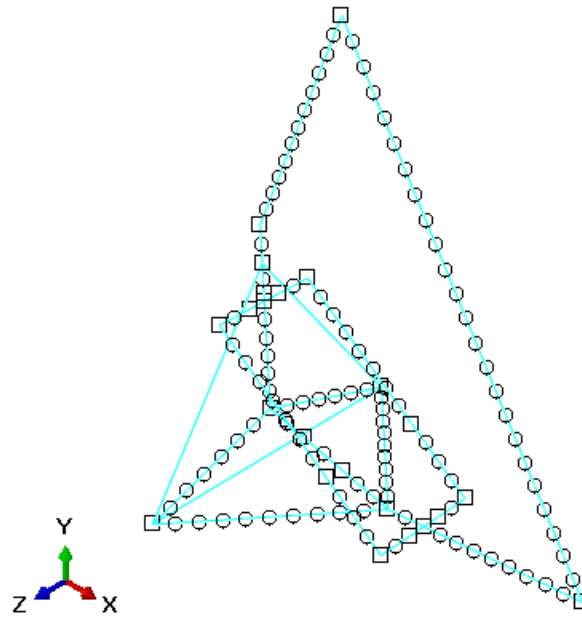
Prema tome maksimalno naprezanje u konzoli iznosi:

$$\sigma_{max} = F_B \cdot 250 \cdot W = 43,9 \text{ N/mm}^2. \quad (3.19)$$

Usporedbom rezultata dobivenih analitičkim i numeričkim proračunom koristeći opciju *Coupling* zaključuje se da su razlike između rezultata neznatne, stoga su rezultati opcije *Coupling* pouzdani.

### 3.2.3 Mreža konačnih elemenata

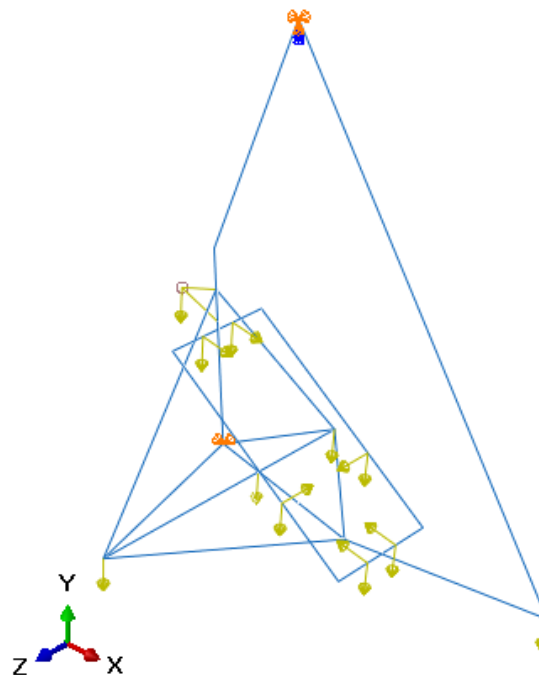
Nakon postavljanja interakcija, opterećenja i rubnih uvjeta, generirana je mreža. Za cijevi se koriste prostorni gredni elementi B33 sa 2 čvora. Za svako uže korišten je jedan prostorni štapni element T3D2. Na slici 44 prikazana je mreža sa 123 gredna konačna elementa i 3 štapna konačna elementa.



Slika 59. Mreža konačnih elemenata

### 3.2.4 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 1

Kao što je već opisano, kod slučaja opterećenja 1 svu silu pilota preuzima okvir sjedala. Sile na cijev 2 u ovom slučaju nema. Opterećenje i rubni uvjeti dodijeljeni u programskom paketu *Abaqus* prikazani su na slici 45.



Slika 60. Sile i rubni uvjeti za slučaj opterećenja 1

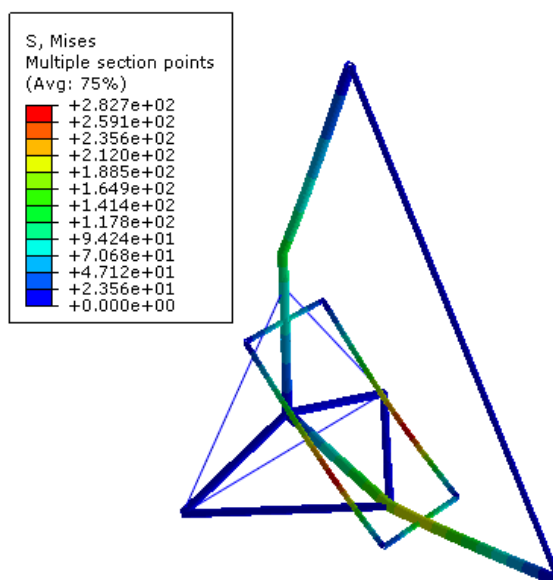


Iznosi sila prikazanih na slici 60 prikazani su u tablici.

**Tablica 6. Iznosi sila za slučaj opterećenja 1**

Sile	Iznosi sila [N]
Sila prednjeg kotača	CF2: -441,45
Sila stražnjeg kotača	CF2: -83,385
Sila platna $F_A/2$	CF1:75,93
	CF2:-187,94
Sila platna $F_B/2$	CF1:-75,93
	CF2:-17,53
Sila platna $F_C/2$	CF2:-1658,4
	CF3:+/-444.366
Sila motora	CF2: -981
Sila spremnika goriva	CF2: -490,5

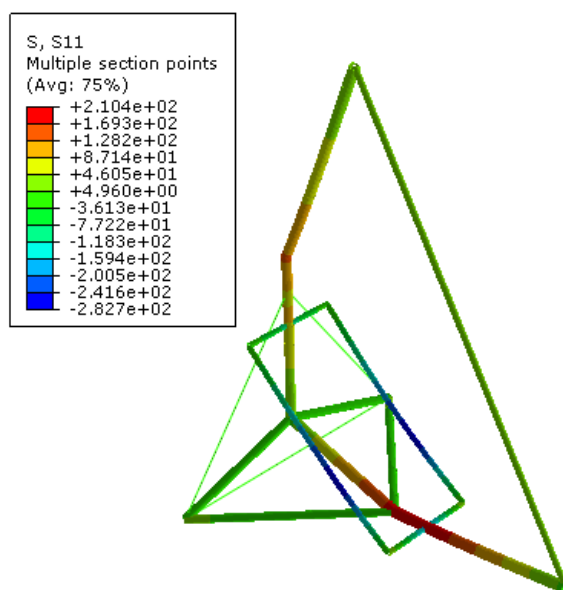
Ekvivalentna naprezanja u  $\text{N/mm}^2$  prikazana su na sljedećoj slici.



**Slika 61. Ekvivalentna naprezanja prema von Misesu za slučaj opterećenja 1**

Najveće ekvivalentno naprezanje iznosi 282,7 MPa na mjestu gdje djeluje sila  $F_c$ , tj. na bočnim cijevima okvira sjedala. To je iznad granice elastičnosti od 240 MPa. Očekivano je da će na tom mjestu naprezanja biti najveća s obzirom na to da najveći dio pilotove težine djeluje upravo

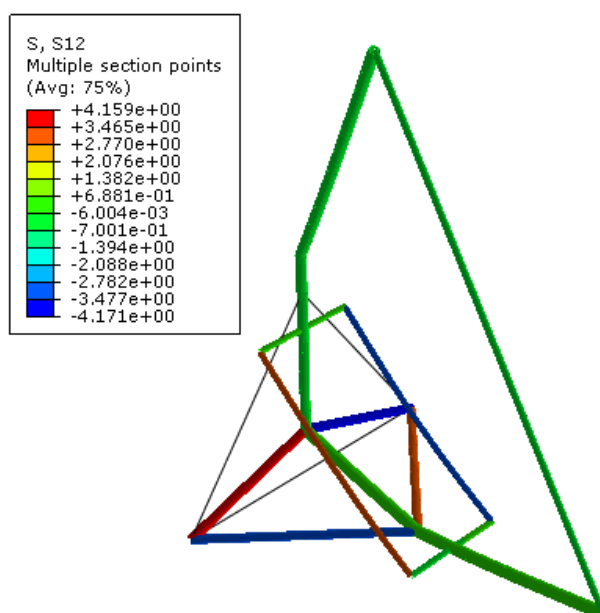
na tom mjestu. Drugo mjesto gdje su napreznja također velika je spoj okvira sjedala i cijevi 1. Tu normalna napreznja iznose 217.6 MPa. Raspodjela normalnih napreznja prikazana je na sljedećim slikama.



**Slika 62. Normalna napreznja za slučaj opterećenja 1**

Vidljivo je da su iznosi ekvivalentnih i normalnih napreznja slični, stoga se može zaključiti da su tangencijalna napreznja malih iznosa. Iznosi napreznja na kritičnom mjestu na bočnim cijevima okvira sjedala negativnog su predznaka što je i logično s obzirom na to kako su postavljene sile kojim platno djeluje na okvir.

Na sljedećoj slici prikazana su tangencijalna napreznja.



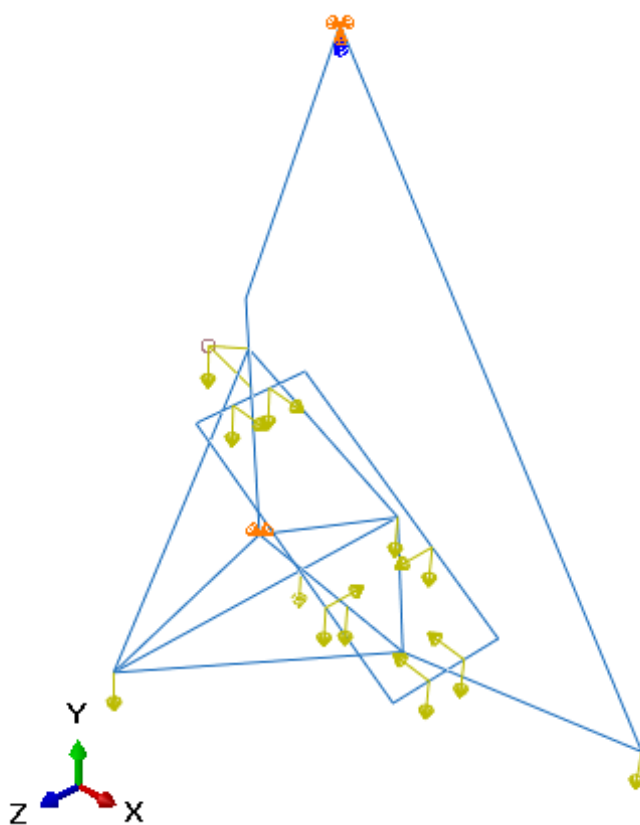
**Slika 63. Tangencijalna napreznja za slučaj opterećenja 1**

Tangencijalna naprezanja su zanemarivo mala u usporedbi s normalnim naprezanjima.

Najveće naprezanje dobiveno analizom za slučaj opterećenja kada svu silu pilota preuzima okvir sjedala znatno prelazi granicu elastičnosti od 240 MPa. Ipak, bitno je napomenuti da je platno u stvarnosti na bočne cijevi okvira sjedala vezano na barem dva mjesta, a u ovoj je analizi pretpostavljeno da je platno ovješeno na samo jedno mjesto na bočnim cijevima. Također, sve su težine pomnožene s faktorom  $S=5$ . Kada se to uzme u obzir može se zaključiti da naprezanja u stvarnosti ipak neće biti toliko velika jer okvir sjedala preuzima samo manji dio sile pilota. Zato će se u nastavku rada analizirati naprezanja u konstrukciji kada je uzeto u obzir da pilot sjeda na cijev 2.

### 3.2.5 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 2

U ovom je slučaju opterećenja pretpostavljeno je da 80% sile pilota preuzima donja cijev, a 20% okvir sjedala. Ovaj slučaj opterećenja najbolje opisuje stvarno opterećenje.



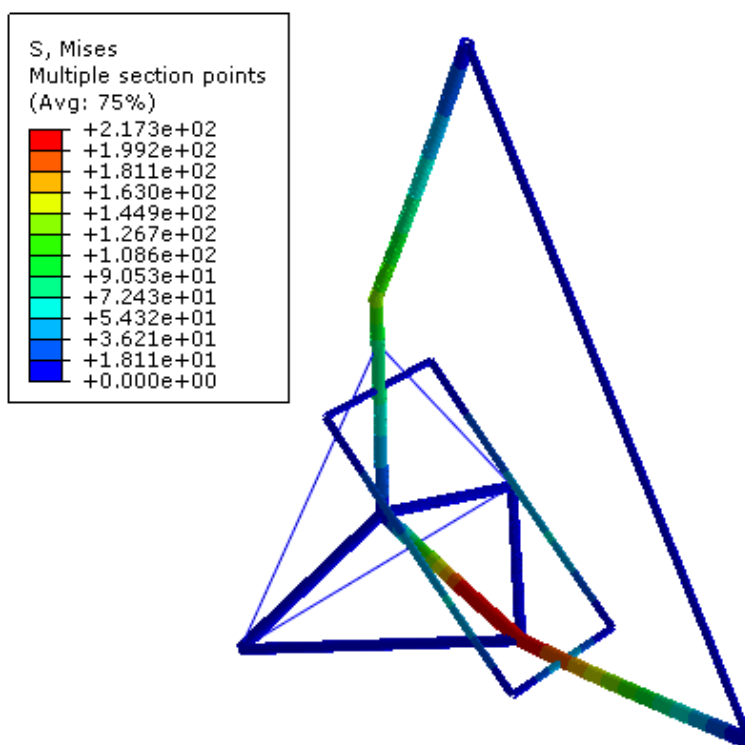
Slika 64. Sile i rubni uvjeti za slučaj opterećenja 2

Iznosi sila prikazanih na slici 61 dani su u tablici 5.

**Tablica 7. Iznosi sila za slučaj opterećenja 2**

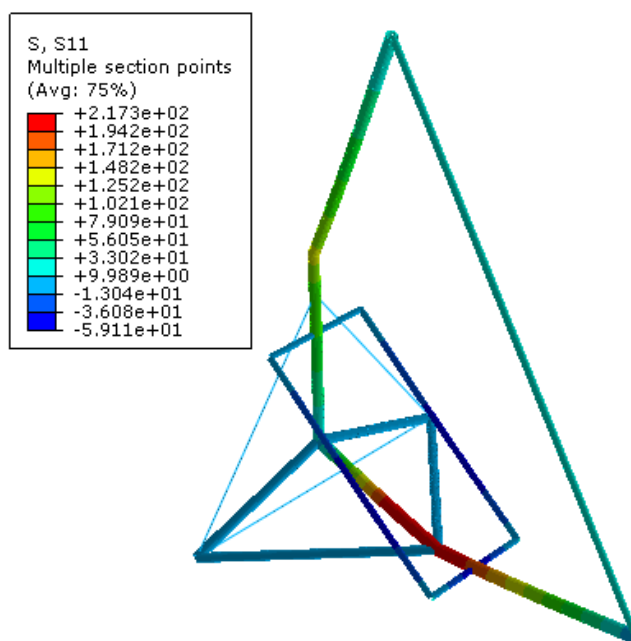
Sile	Iznosi sila [N]
Sila prednjeg kotača	CF2: -441,45
Sila stražnjeg kotača	CF2: -83,385
Sila platna $F_A/2$	CF1:75,93
	CF2:-187,94
Sila platna $F_B/2$	CF1:-75,93
	CF2:-17,53
Sila platna $F_C/2$	CF2:-1658,4
	CF3:+/-444.366
Sila motora	CF2: -981
Sila spremnika goriva	CF2: -490,5
Sila pilota na cijev 2	CF2: -2982,24

Ekvivalentna naprezanja prikazana su na sljedećoj slici.



**Slika 65. Ekvivalentna naprezanja za slučaj opterećenja 2**

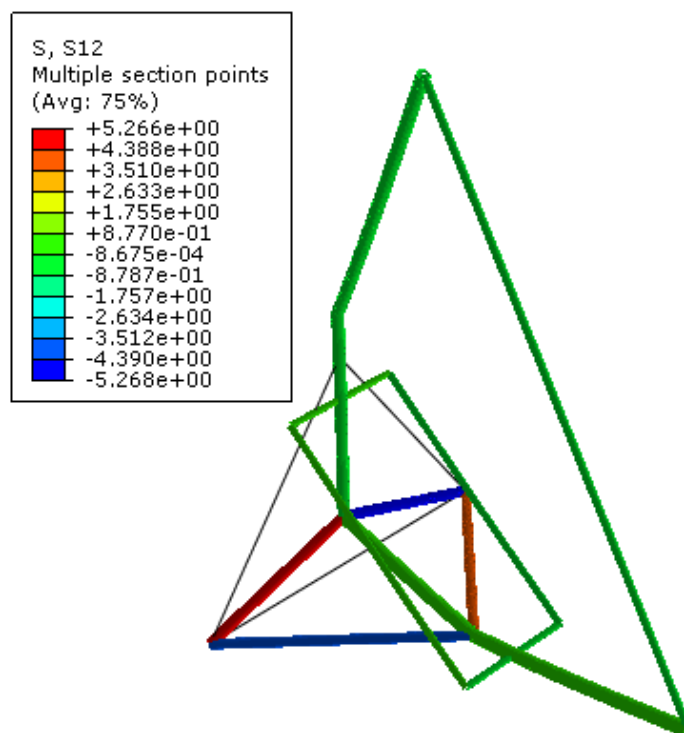
Normalna naprezanja prikazana su na sljedećoj slici.



**Slika 66. Normalna naprezanja za slučaj opterećenja 2**

Najveće normalno naprezanje je na mjestu djelovanja sile na cijev 2 te iznosi 217,3 MPa što je ispod granice elastičnosti materijala. Najveće naprezanje okvira sjedala i dalje je na bočnim cijevima i iznosi -59,11 MPa.

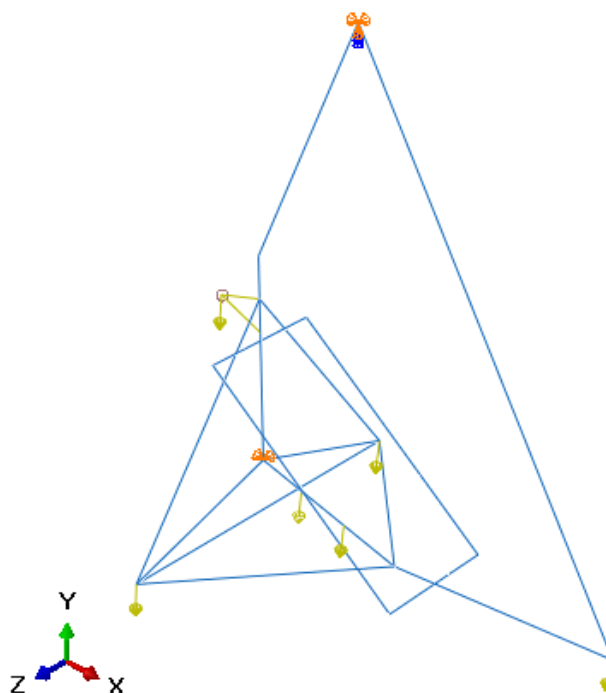
Tangencijalna naprezanja prikazana su na slici.



**Slika 67. Tangencijalna naprezanja za slučaj opterećenja 2**

### 3.2.6 Numeričko rješenje za slučaj opterećenja 3

U ovom slučaju pretpostavljeno je da sva težinu pilota djeluje na cijev 2.

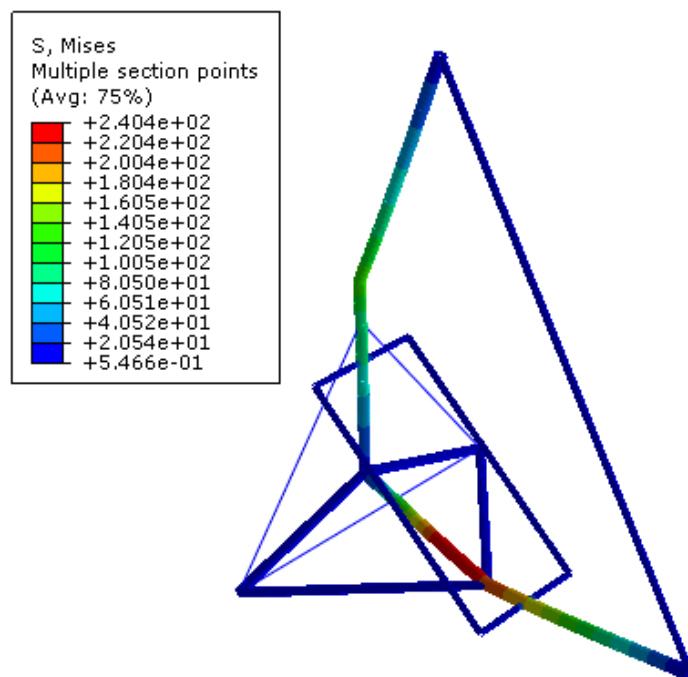


Slika 68. Sile i rubni uvjeti u slučaju opterećenja 3

Tablica 8. Iznosi sile za slučaj opterećenja 3

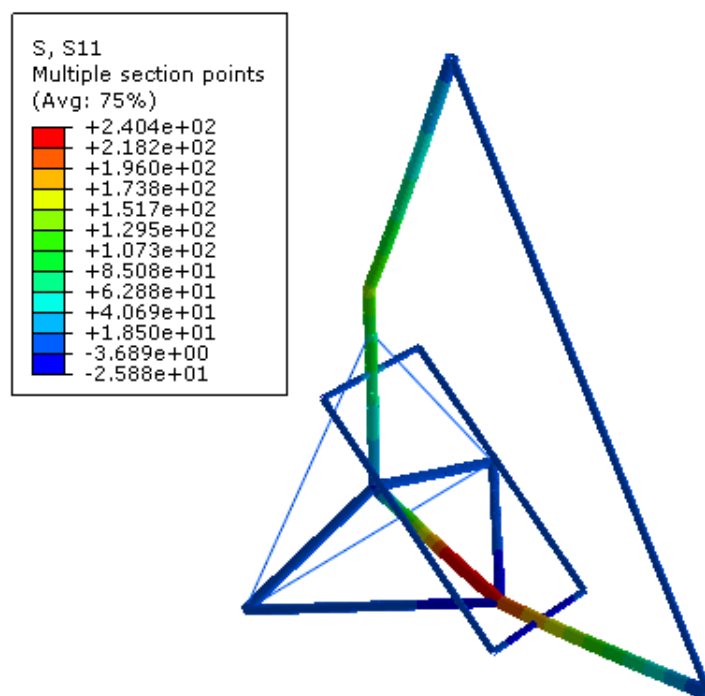
Sile	Iznosi sile [N]
Sila prednjeg kotača	CF2: -441,45
Sila stražnjeg kotača	CF2: -83,385
Sila motora	CF2: -981
Sila spremnika goriva	CF2: -490,5
Sila pilota na cijev 2	CF2: -3727,8

Ekvivalentna su naprezanja prikazana na slici 69. Najveće naprezanje (240,4 MPa) opet je na mjestu gdje sila pilota djeluje na cijev 2. Iznos sile je na samoj granici elastičnosti.

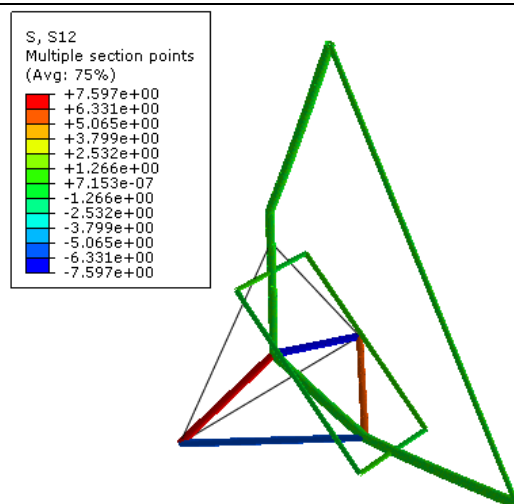


**Slika 69.** Ekvivalentna naprezanja za slučaj opterećenja 3

Normalna naprezanja prikazana su na sljedećoj slici.



**Slika 70.** Normalna naprezanja za slučaj opterećenja 3

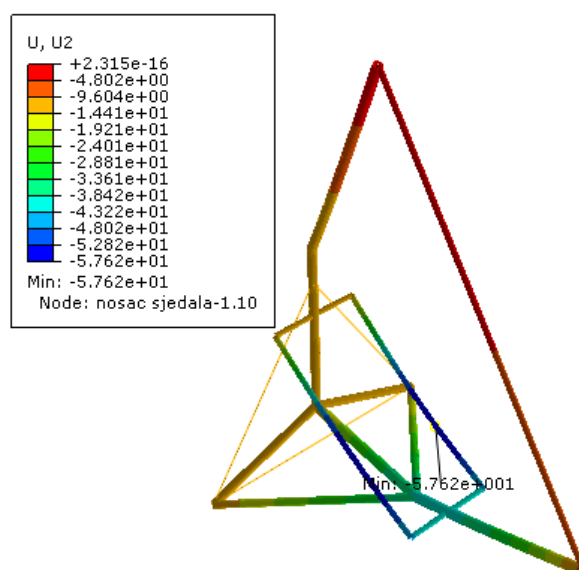


**Slika 71. Tangencijalna naprezanja za slučaj naprezanja 3**

Maksimalno naprezanje konstrukcije prelazi granicu elastičnosti samo za prvi slučaj opterećenja. S obzirom na to da takvo opterećenje kada svu silu pilota preuzima okvir sjedala nije posve realno, može se zaključiti da su cijevi dobro dimenzionirane te nema potrebe za povećanjem promjera ili debljina stijenke jer se konstrukcija ne smije predimenzionirati.

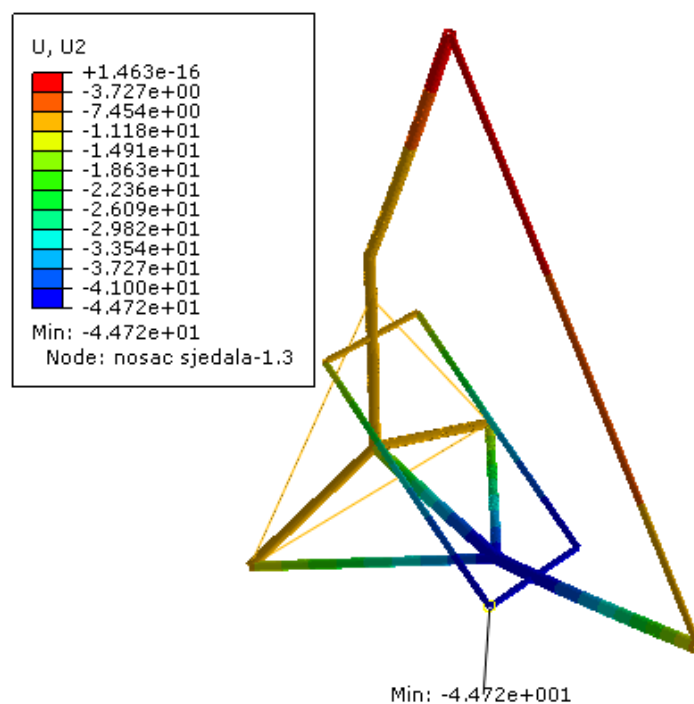
### 3.2.7 Pomaci konstrukcije tijekom leta

U ovom poglavlju prikazani su pomaci konstrukcije u vertikalnom smjeru pri 5G opterećenju. Pomaci su najveći za slučaj najnepovoljnijeg opterećenja kada silu pilota preuzima isključivo okvir sjedala i iznose -57,6 mm. Za slučaj opterećenja 2 i 3, najveći pomak iznosi -44,7, odnosno 45,1 mm.

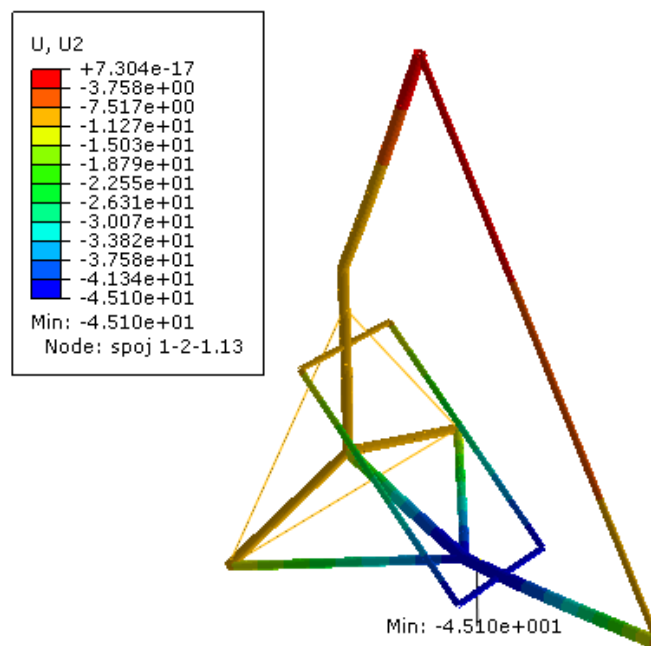


**Slika 72. Pomaci za slučaj opterećenja 1**





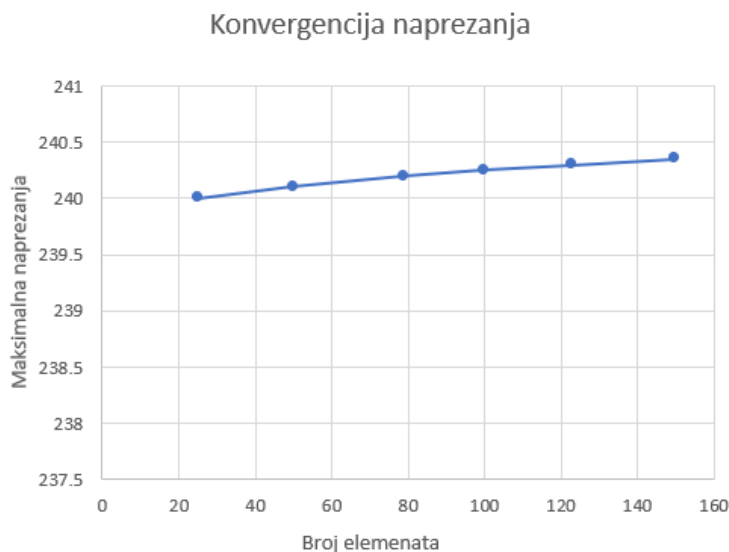
Slika 73. Pomaci za slučaj opterećenja 2



Slika 74. Pomaci za slučaj opterećenja 3

### 3.2.8 Konvergencija naprezanja

Kako bi se provjerila valjanost dobivenih rezultata, prikazat će se konvergencija normalnih naprezanja. Generirane su mreže različitog broja grednih elemenata za slučaj opterećenja 2.



**Slika 75. Konvergencija rješenja**

Iz grafa se može zaključiti da su rješenja točna s mrežom od 123 gredna i 3 štapna elementa koja je korištena za prethodne analize.

### 3.2.9 Usporedba rezultata analize za različite slučajeve opterećenja

Prema provedenoj numeričkoj analizi za tri slučaja opterećenja, iznos naprezanja za slučaj 1 kada okvir sjedala preuzima svu silu pilota prelazi granicu elastičnosti. Za slučaj kada silu pilota preuzima isključivo cijev 2 najveći iznos naprezanja na granici je elastičnosti materijala. S obzirom na to da su se naprezanja proračunavala za 5G opterećenje za koje je mala vjerojatnost da će se ikada dogoditi, može se zaključiti da su promjeri i debljine stijenke zadovoljavajući. Bitno je da cijevi ne budu predimenzionirane jer je ipak mala masa konstrukcije najvažnije svojstvo mikrolakih ovjesnih jedrilica. Osim analize naprezanja tijekom leta, potrebno je provesti analizu naprezanja prilikom slijetanja i tek nakon toga eventualno promijeniti dimenzije te dodatno optimirati konstrukciju. Tijekom leta cijevi 6 i 7 djelomično preuzimaju težinu kotača (težinu kotača preuzima i gornja užad) pa je naprezanje tih cijevi zanemarivo i varira od 7 MPa do 13 MPa, ovisno o slučaju opterećenja. Međutim, prilikom slijetanja opterećenje cijevi 6, 7 i pogotovo donjeg užeta bit će veće.

### 3.3 Analiza naprezanja tijekom slijetanja

Postupak slijetanja motornih ovjesnih jedrilica opisan je u uvodu rada. Slijetanje je bolje što je položaj kolica horizontalniji, tj. prilikom idealnog slijetanja svi kotači u istom trenutku dotiču podlogu. S obzirom na to da je slijetanje prilikom kojeg prednji kotač prvi dotiče tlo iznimno

nepovoljno i opasno, potrebno je kolica konstruirati tako da tijekom leta prednji kotač bude oko petnaest centimetara viši od stražnjih kotača kako bi se osiguralo da stražnji kotači prvi dotaknu tlo (vidi 0). Tada dolazi do momenta oko osi stražnjih kotača koji zakreće kolica te trenutak poslije i prednji kotač dotiče tlo. Prilikom slijetanja dolazi do udarnog opterećenja koje svoj maksimum postiže u trenutku kada svi kotači dotaknu podlogu. Analiza naprezanja konstrukcije pri slijetanju provest će se za najrealniji slučaj opterećenja kolica, odnosno za slučaj opterećenja 2.

### 3.3.1 Udarno opterećenje

Udarno opterećenje je svako opterećenje koje počinje naglo djelovati na konstrukciju ili ako se naglo promijeni opterećenje koje već djeluje na konstrukciju.

Sustav kojeg čine motorna ovjesna jedrilica i pilot u trenutku slijetanja ima vertikalnu brzinu  $v_v$  pa kinetička energija u vertikalnom smjeru glasi:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_v^2. \quad (3.20)$$

Od trenutka udara kada je vertikalna brzina maksimalna ( $v_v = v_{\text{max}}$ ) pa do trenutka kada vertikalna brzina 0 ( $v_v = 0$ ), težište sustava se spusti za dinamički progib  $w_{\text{din}}$  pri čemu se potencijalna energija smanji za:

$$\Delta E_p = m g w_{\text{din}}. \quad (3.21)$$

Iz zakona očuvanja energije vrijedi izraz:

$$\frac{1}{2} m v_v^2 + m g w_{\text{din}} = \frac{1}{2} F_{\text{din}} w_{\text{din}}. \quad (3.22)$$

gdje je  $F_{\text{din}}$  dinamička sila. Lijeva strana jednadžbe predstavlja energiju sustava, a desna strana rad dinamičke sile. Kada progib dostigne najveću vrijednost, dinamička sila također postiže svoj maksimum i iznosi:

$$F_{\text{din}} = k_f w_{\text{din}}. \quad (3.23)$$

gdje je  $k_f$  krutost elastične konstrukcije i ekvivalentna je krutosti opruge što znači da je pretpostavka da iznos sile linearno ovisi o progibu. Statička sila u ovom je sustavu težina i dana je izrazom:

$$F_{\text{st}} = m g = k_f w_{\text{st}}, \quad (3.24)$$

gdje je  $w_{\text{st}}$  statički progib težišta sustava. Iz gore navedene jednadžbe dobije se izraz:

$$k_f = \frac{F_{st}}{w_{st}}. \quad (3.25)$$

Uvrštavanjem gore navedenog izraza za  $k_f$  u izraz 3.23 dobije se:

$$F_{din} = \frac{w_{din}}{w_{st}} F_{st} = k_d F_{st}, \quad (3.26)$$

gdje je  $k_d$  faktor udara.

Kada izraz 3.26 uvrstimo u izraz 3.22, rješavanjem kvadratne jednadžbe se dobije:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_v^2}{w_{st}g}}. \quad (3.27)$$

Iznos faktora udara može se odrediti poznavajući vertikalnu komponentu brzine slijetanja te statičkog progiba. Pretpostavit će se da brzina iznosi 40km/h, odnosno 11,1m/s. S obzirom na to da je cilj postići što horizontalnije slijetanje, pretpostavit će se da kut između smjera gibanja jedrilice i tla iznosi  $6^\circ$ . To znači da vertikalna komponenta brzine slijetanja ( $v_v$ ) iznosi:

$$v_v = v \cdot \sin 6^\circ = 1,16 \text{ m/s}. \quad (3.28)$$

Statički progib zapravo je progib težišta sustava onda kada je sustav opterećen vlastitom težinom ( $F_{st}$ ). On je određen pomoću programskog paketa *Abaqus* tako da su postavljeni rubni uvjeti koji odgovaraju slučaju kada motorna ovjesna jedrilica stoji na tlu. Isti rubni uvjeti vrijede i za slučaj slijetanja jedrilice. Statički progib iznosi 4,77 mm. Kada su poznate vrijednosti vertikalne brzine i statičkog progiba uvrste u izraz za faktor udara dobije se:

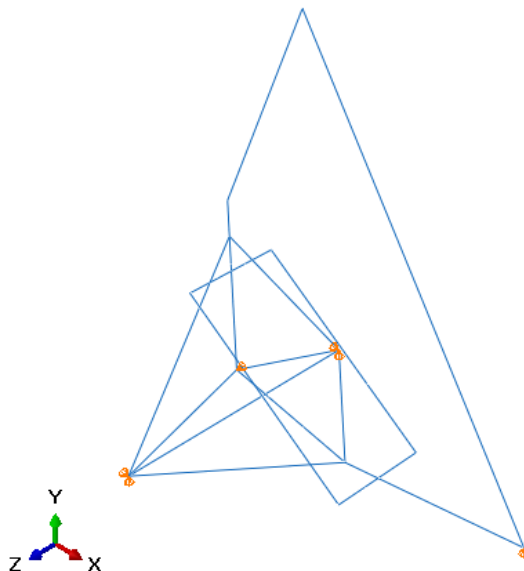
$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{1,16^2}{0,00477 \cdot 9,81}} = 6,45 \quad (3.29)$$

Sve sile koje djeluju na konstrukciju (slučaj opterećenja 2) će se pomnožiti s izračunatim faktorom udara  $k_d$ . Bitno je naglasiti da prilikom slijetanja dolazi do deformacije guma kotača što ovdje nije uzeto u obzir. Progib bi u tom slučaju bio veći što bi rezultiralo manjim faktorom udara, stoga se može zaključiti da će iznosi naprezanja u sljedećoj analizi biti veći nego što su u stvarnosti.

### 3.3.2 Rubni uvjeti tijekom slijetanja

Rubni uvjeti postavljeni su tako da su onemogućeni pomaci stražnjih kotača u X i Y smjeru, prednjem kotaču onemogućen je pomak samo u Y smjeru te je još na mjestu spoja cijevi 2 i 3 onemogućen pomak u Z smjeru. Bitno je da je stražnjim kotačima omogućen pomak u Z smjeru

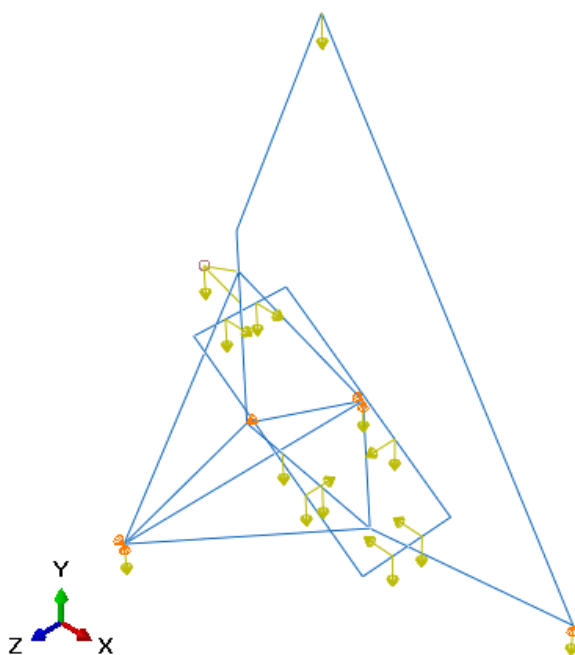
jer prilikom slijetanja donje uže će se rastegnuti te preuzeti velik dio opterećenja. Tako postavljene rubne uvjete odgovaraju rubnim uvjetima u trenutku kada kolica slijeću sa svim kotačima.



**Slika 76. Rubni uvjeti prilikom slijetanja**

### 3.3.3 Opterećenje tijekom slijetanja

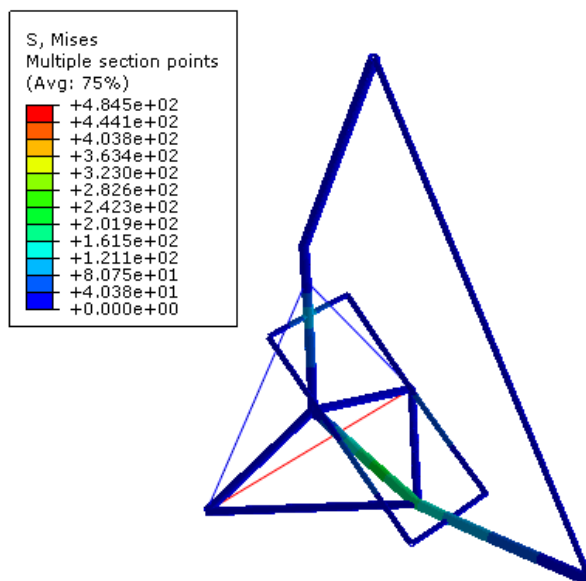
Sve sile koje su djelovale tijekom leta djeluju na konstrukciju i prilikom slijetanja. Konstrukciju opterećuje i težina zmaja, sila koja tijekom leta nije imala nikakvog utjecaja na konstrukciju. Sile su prikazane na slici 77.



**Slika 77. Opterećenje tijekom slijetanja**

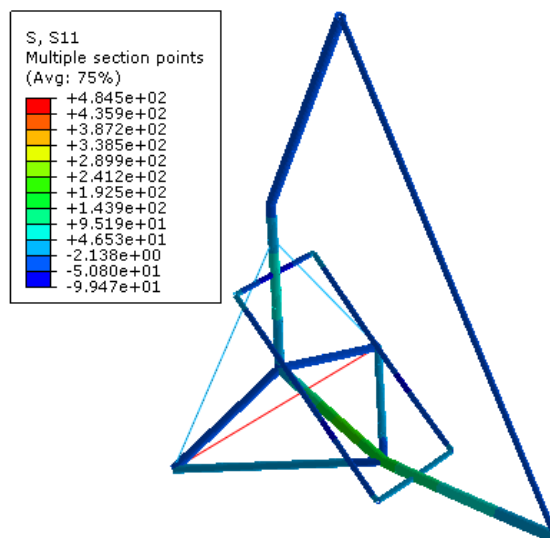
### 3.3.4 Naprezanja konstrukcije tijekom slijetanja

Ekvivalentna naprezanja konstrukcije prikazana su na slici



Slika 78. Ekvivalentna naprezanja tijekom slijetanja

Normalna naprezanja konstrukcije prikazana su na slici 79.

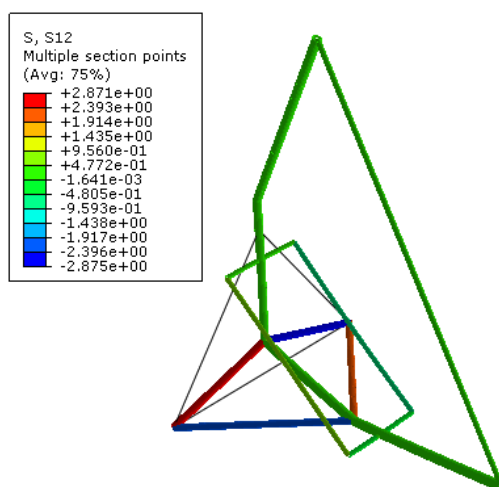


Slika 79. Normalna naprezanja tijekom slijetanja

Iz slike 54 se vidi da je najveće normalno naprezanje u donjem užetu što je i očekivano. To naprezanje iznosi 484,5 MPa što ne predstavlja problem jer je vlačna čvrstoća Dyneema vlakana 3 GPa. Naprezanja cijevi 6 i 7, koje tijekom leta nisu značajno opterećene i dalje su malih iznosa; ekvivalentno naprezanje cijevi 6 je 39,73 MPa, a cijevi 7 je 6,38 MPa. Iz ove analize može se zaključiti da je korištenje užadi uistinu najbolje rješenje jer prilikom slijetanja najveći

dio dinamičkog opterećenja preuzima uža, a ne cijevi. Na mjestu djelovanja sile pilota na cijev 2 dolazi do normalnog naprezanja iznosa 215,433 MPa.

Tangencijalna naprezanja konstrukcije prikazana su na slici 56.



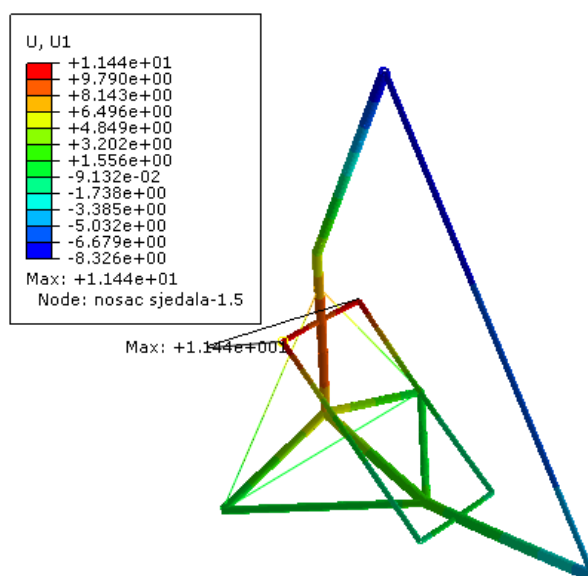
**Slika 80. Tangencijalna naprezanja prilikom slijetanja**

Kao i kod analize naprezanja tijekom leta, pri slijetanju su također tangencijalna naprezanja zanemarivog iznosa u odnosu na normalno naprezanje.

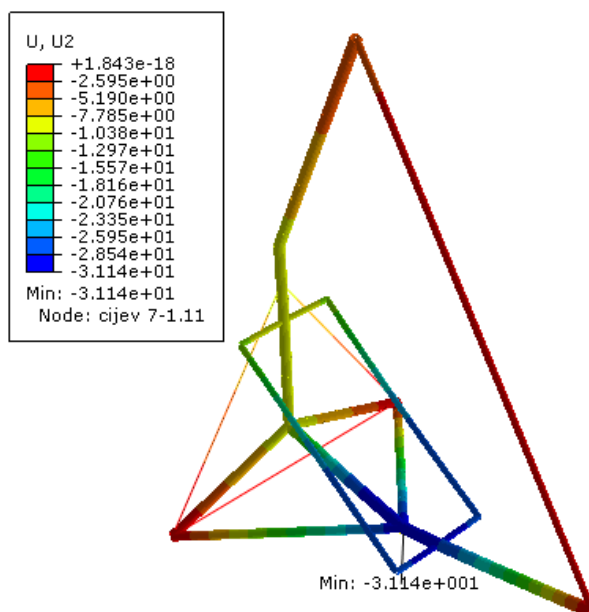
Progibi konstrukcije u X, Y i Z smjeru prikazani su na sljedećim slikama.

### 3.3.5 Pomaci konstrukcije tijekom slijetanja

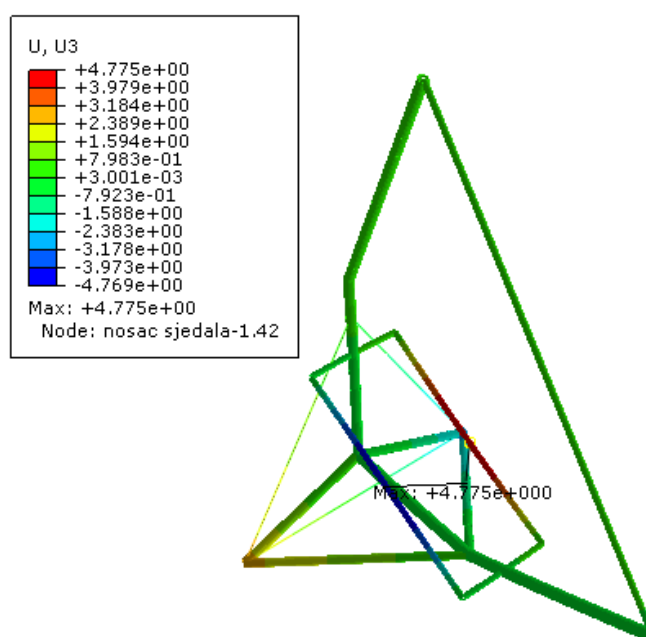
Na slikama u ovom poglavlju, prikazani su pomaci do kojih dolazi prilikom slijetanja motorne ovjesne jedrilice.



**Slika 81. Progib u smjeru X osi**



Slika 82. Progib u smjeru Y osi



Slika 83. Progib u smjeru Z osi

Iznosi progiba u X i Z smjeru mali su u odnosu na progibe u Y smjeru. To je očekivano s obzirom na to da opterećenje konstrukcije čine težine kojima je smjer djelovanja vertikalni, u smjeru -Y. Maksimalni iznos progiba u X smjeru je na spoju bočnih i gornje cijevi okvira sjedala i iznosi 11,44 mm. Najveći vertikalni progib je na spoju cijevi 1 i 2 i iznosi -31,14 mm. U smjeru Z osi najveći progib iznosi 4,775 mm, a manji progib u Z osi postoji i na mjestu stražnjih kotača.

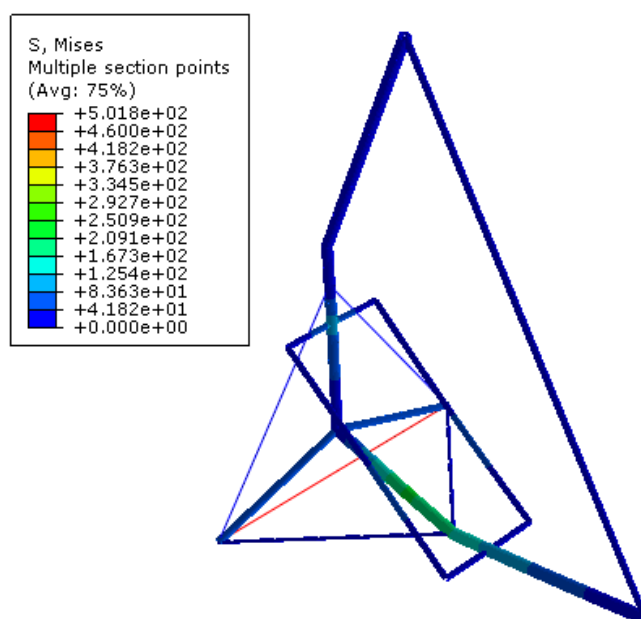


### 3.3.6 Naprezanja konstrukcije tijekom slijetanja nakon izmjena dimenzija cijevi

S obzirom na to da je postizanje male mase konstrukcije imperativ u zrakoplovstvu, konstrukcija mora biti optimalno dimenzionirana. Kao što je već opisano u podnaslovu 3.2.9, cijevi 1,2,3,4 dobro su dimenzionirane. Cijev 2 je i tijekom slijetanja značajno opterećena, ali maksimalno naprezanje te cijevi od 215,433 MPa ne prelazi granicu elastičnosti materijala pa se može ustvrditi da dimenzije profila 50,8x3,175 mm zadovoljavaju kriterije čvrstoće. Međutim, kod cijevi 6 i 7 koje očekivano nisu mnogo opterećene tijekom leta, ni prilikom slijetanja ne dolazi do značajnih naprezanja te su maksimalni iznosi ekvivalentnih naprezanja 39,73 MPa za cijevi 6 i 6,38 MPa za cijevi 7. To znači da su cijevi predimenzionirane te će promjeri i debljine stijenke biti izmijenjeni.

Tako će umjesto dimenzija 41,275x2,1082 mm cijevi 6 imati promjer i debljinu stijenke 31,75x2,1082 mm. Promjer i debljina stijenke cijevi 7 su sa 19,05x2,1082 mm izmijenjeni na 15,875x1,651 mm.

Nakon izmjena navedenih dimenzija provjerena su naprezanja konstrukcije prilikom slijetanja opisanog u podnaslovu 3.3.4.



**Slika 84. Ekvivalentna naprezanja konstrukcije s izmijenjenim profilima**

Vlačno naprezanje donjeg užeta očekivano je poraslo s 484,5 MPa na 501,8 MPa. Također je poraslo maksimalno naprezanje cijevi 6 na 53,55 MPa dok je naprezanje cijevi 7 sada 6 MPa. Najveće ekvivalentno naprezanje cijevi 2 je neznatno poraslo sa 215,433 MPa na 217,12 MPa.

## 4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada bilo je potrebno osmisлити i razraditi koncept mikrolake ovjesne jedrilice s motorom te provesti numeričku analizu konstrukcije.

Koncept kolica koja su uz zmaj osnovni dio motorne ovjesne jedrilice, osmišljen je nakon definiranja konstrukcijskih zahtjeva i usporedbe postojećih proizvoda na tržištu te analizom prednosti i nedostataka pojedinih konstrukcijskih rješenja. Glavni kriteriji za konstruiranje motorne ovjesne jedrilice su mala masa konstrukcije, jednostavnost izrade dijelova i postizanje što bolje sklopivosti konstrukcije kako bi transport ovjesne jedrilice bilo što lakši. Kako bi kolica bila u potpunosti funkcionalna, fokus razrade koncepta bio je na dimenzioniranju cijevi s naglaskom na važnost postizanja udobnog položaja sjedenja za pilote različitih visina. Osim ergonomičnosti, kriteriji prema kojima se dimenzioniraju cijevi kolica su postizanje pozitivnog napadnog kuta te povišenost prednjeg kotača u odnosu na stražnje kotače tijekom leta zbog sigurnog slijetanja.

Nakon definiranja duljina cijevi, potrebno je definirati promjer i debljine stijenke koji najviše ovise o opterećenju konstrukcije. Stoga je provedena numerička analiza za više slučajeva opterećenja tijekom leta. Sve su težine pomnožene s faktorom 5 jer prilikom naglih promjena smjerova kretanja ili zbog jakih turbulencija može doći do povećanja iznosa sila koje djeluju na konstrukciju. Uvjeti čvrstoće su zadovoljeni za dva slučaja opterećenja, kada svu težinu pilota preuzima cijev ispod sjedišta te kada se težina pilota rasporedi na tu cijev i na okvir sjedala. Naprezanja su bila iznad granice elastičnosti aluminijske legure 6061 T6 samo u slučaju kada svu težinu pilota preuzima okvir sjedala, ali s obzirom na to da takav slučaj opterećenja nije realan može se zaključiti da nema potrebe za povećanjem promjera i debljina stijenki cijevi. Nakon analize naprezanja tijekom leta, provjereni su iznosi naprezanja prilikom slijetanja jedrilice. Tada dolazi do udarnog opterećenja, stoga je izračunat faktor udara kojim su pomnožene sve sile. Nakon analize zaključeno je da su cijevi stražnjih kotača predimenzionirane te je provedena još jedna analiza sa smanjenim promjerima i debljinama stijenki tih cijevi, te je zaključeno da nema potrebe za dodatnim optimiranjem konstrukcije.

U svrhu dodatnog smanjenja mase konstrukcije potrebno je provesti detaljniju analizu naprezanja s 3D elementima. Također, potrebno je na isti način analizirati čelični zglobov između cijevi 1 i 2 koji prema prikazanim rezultatima ima najveće naprezanje od svih zglobova konstrukcije što u sklopu ovog rada nije razmatrano.

---

**LITERATURA**

- [1] [Mrežno] <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/307-hang-gliders> [Pristup 19.10.2019.]
- [2] V. Y. Mudkavi, »Powered Hang Gliding,« *Resonance*, pp. 50-60, 2003
- [3] [Mrežno] [http://the-wanderling.com/type\\_9.html](http://the-wanderling.com/type_9.html) [Pristup 16.10.2019.]
- [4] [Mrežno] <http://www.propisi.hr/print.php?id=8119> [Pristup 26.11.2019.]
- [5] [Mrežno] <https://www.wptv.com> [Pristup 16.10.2019.]
- [6] [Mrežno] [https://en.wikipedia.org/wiki/Hang\\_gliding](https://en.wikipedia.org/wiki/Hang_gliding) [Pristup 16.10.2019.]
- [7] [Mrežno] <https://www.icaro2000.com/Products/Trike/Trike.htm#51> [Pristup 19.10.2019.]
- [8] [Mrežno] <http://www.northwing.com/atf-trike.aspx> [Pristup 19.10.2019.]
- [9] [Mrežno] [https://www.aeros.com.ua/structure/nanotrikes/AnT\\_en.php](https://www.aeros.com.ua/structure/nanotrikes/AnT_en.php) [Pristup 20.10.2019.]
- [10] [Mrežno] <http://www.airtrikes.net/wings.shtml> [Pristup 26.11.2019.]
- [11] [Mrežno] [https://www.airborne.com.au/pages/ml\\_v-lite.php](https://www.airborne.com.au/pages/ml_v-lite.php) [Pristup 20.10.2019.]
- [12] [Mrežno] <https://www.euroflyulm.com/fr/snake-trike> [Pristup 19.10.2019.]
- [13] K. Zuanović, »Završni rad,« Zagreb, 2019.
- [14] [Mrežno] <http://laboratoridenvol.com/info/tech/tubes.en.html> [Pristup 25.11.2019.]
- [15] M. Mlinarec, »Završni rad,« Zagreb, 2019.
- [16] [Mrežno] <http://abaqus.software.polimi.it.html> [Pristup 21.11.2019.]
- [17] H. Varenina, »Završni rad,« Zagreb, 2018.
- [18] [Mrežno] [https://en.wikipedia.org/wiki/6061\\_aluminium\\_alloy](https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy) [Pristup 24.11.2019.]
- [19] [Mrežno] <http://www.pelicanrope.com> [Pristup 25.11.2019.]
- [20] [Mrežno] <https://medium.com> [Pristup 16.10.2019.]
- [21] [Mrežno] <https://afors.com/aircraftView/41481> [Pristup 20.10.2019.]
- [22] [Mrežno] <https://www.ecvv.com> [Pristup 23.11.2019.]
- [23] [Mrežno] <http://www.corsairmotors.com> [Pristup 24.11.2019.]